IMPRENTA ROSGAL
Hilario Rosillo
Ejido, 1624
Montevideo (Uruguay)
1 9 4 9

LA ENERGÍA ATÓMICA

FACULTAD DE MEDICINA DE MONTEVIDEO

PUBLICACIONES DEL INSTITUTO DE RADIOLOGÍA
Y CIENCIAS FÍSICAS

DIRIGIDAS POR EL PROF. PEDRO A. BARCIA

SERIE E

# LA ENERGÍA ATÓMICA

## NOCIONES DE DIVULGACIÓN



MONTEVIDEO

FACULTAD DE MEDICINA DE MONTEVIDEO

PUBLICACIONES DEL INSTITUTO DE RADIOLOGÍA
Y CIENCIAS FÍSICAS

DIRIGIDAS POR EL PROF. PEDRO A. BARCIA

SERIE E

# LA ENERGÍA ATÓMICA

## NOCIONES DE DIVULGACIÓN



MONTEVIDEO

Imprenta "Rosgal", de Hilario Rosillo. — Ejido, 1624. Montevideo (Uruguay) — 1949

# PRÓLOGO

*El Director del Servicio de Sanidad Militar, Dr. Guillermo Rodríguez Guerrero, sintiendo la necesidad de que tanto los médicos como los demás miembros de su personal, conozcan los problemas de la energía atómica, sobre todo en lo que se refiere a las consecuencias de su uso bélico y a los peligros inmediatos y mediatos que pueden derivar, se dirigió al Prof. Pedro A. Barcia, Director del Instituto de Radiología y Ciencias Físicas de la Facultad de Medicina, para que planeara una serie de conferencias que permitan comprender la posibilidad de que las substancias radioactivas puedan llegar a transformarse en la mayor fuente de energía que se conoce sobre la tierra y dar lugar a una emisión de radiaciones que multiplica sus peligros y los prolonga por mucho tiempo después de su explosión.*

*Se programó una serie de conferencias tratando de que, en la forma más sencilla posible, se pueda apreciar cómo los descubrimientos se han ido sucediendo de modo de llegar a obtener minerales radioactivos que exploten en determinadas circunstancias, produciendo desastres no sólo por la energía que liberan, sino por la gran cantidad de radiaciones que quedan como residuos.*

*Esas conferencias se iniciaron con una disertación del profesor Barcia, historiando sucintamente la correlación entre los descubrimientos que han permitido llegar a nuestros conocimientos actuales sobre lo que es el átomo y cómo se puede aprovechar la enorme energía que almacena.*

*El ingeniero Walter Hill, Director del Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería, habló seguidamente sobre:* El átomo y sus constituyentes elementales.

*En otra conferencia el Prof. Néstor Bernardo Cacciapuoti, Director del Instituto de Física de la Universidad de Trieste, desarrolló el tema:* Cómo se ha llegado a utilizar la fisión nuclear como fuente de gran energía. *Los puntos que trató fueron los siguientes: "El fenómeno de la fisión", "La reacción en cadena", "La pila de uranio", "Los explosivos atómicos". El Dr. Caccia-*

*puoli es una de las autoridades mundiales en lo que se refiere a estudios atómicos, y la razón de su estadía temporaria en Montevideo es que la "United Nations Educational, Scientific y Cultural Organisation", es decir, "Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science y la Culture" (U. N. E. S. C. O.) lo ha designado para que organice en Montevideo el "Centro de Cooperación Científica para toda América Latina".*

*Por último, el Prof. Alfonso Frangella, Subdirector del Instituto de Radiología y Ciencias Físicas, expuso lo referente a* La explosión atómica desde el punto de vista médico, *separando dos partes: "Efectos inmediatos, mediatos y alejados sobre los organismos y zonas afectadas por las radiaciones y la radioactividad residual" y la "Utilización de la energía nuclear en Biología y Medicina".*

*Una parte del material gráfico fué tomado de libros y revistas científicas y de divulgación, de distinta procedencia, de modo de hacer más fácil la comprensión de los complicados fenómenos y efectos expuestos en la presente publicación.*

---

*Las renovadas solicitudes para que repitiéramos en distintos ambientes lo que hicimos en el Hospital Militar, nos impulsa a hacer esta publicación, ampliando lo hecho allí. Cuando se trata de divulgar cuestiones científicas complejas, hay que cuidar que el deseo de hacerlo accesible no lleve a una excesiva simplificación que desfigure la verdad. Hemos tratado de mantenernos en el nivel comprensible para la mayor cantidad de personas, sin desfigurar los hechos; esto nos obliga a mantener cierto tecnicismo indispensable para ser útiles a los estudiantes de los Liceos e Institutos Normales.*



# CORRELACIÓN ENTRE LOS DESCUBRIMIENTOS CIENTÍFICOS QUE HAN PERMITIDO LLEGAR AL CONOCIMIENTO Y LA UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA ATÓMICA

Prof. Dr. **PEDRO ALBERTO BARCIA** (*)

Es difícil que existan descubrimientos científicos aislados. Generalmente se hacen de tal modo que, revelando un hecho nuevo sirven de excitante a la curiosidad de los hombres que investigan y da lugar a orientaciones que hacen surgir otras comprobaciones.

Por eso suele decirse que un descubrimiento es un eslabón más en una cadena en la que ya había una porción de verdades comprobadas.

Ramón y Cajal sintetiza el progreso de la Ciencia en esta frase: "Cada verdad hallada, por pequeña e insignificante que parezca, constituye un avance desde el que se perciben nuevos horizontes que incitan la curiosidad de los que investigan. Abre caminos que son los que permiten el avance de la Ciencia". Si queremos remontarnos a los predecesores del descubrimiento que en 1943 dió lugar a que el mundo se quedara asombrado ante la potencia de destrucción que acabó con Hiroshima tendríamos que ir muy lejos. Vamos a limitarnos al nacimiento de la Ciencia de las Radiaciones en el siglo XIX.

**El concepto clásico de indestructibilidad del átomo, límite de división de la materia recibe un rudo golpe con el descubrimiento de los electrones y los rayos Röntgen que plantean esta pregunta: ¿Cómo explicar que si el átomo constituía el último extremo de la división de la materia, salieran del cátodo de esa ampolla corpúsculos? Becquerel y los esposos Curie mostraron después que había substancias que desprendían radiaciones y esa emisión de rayos ya suponía una actividad especial de la materia. Había una vida interior que pasó inadvertida hasta entonces.**

(*) Director del Instituto de Radiología y Ciencias Físicas. Profesor de Radiología de la Facultad de Medicina de Montevideo.

La Radiología como Ciencia surgió al describir Guillermo Röntgen (de Wurzbourg, Alemania) unas radiaciones que emanaban de la ampolla de Crookes. Se trataba de rayos misteriosos que impresionaban las placas radiográficas y atravesaban los cuerpos opacos en razón inversa de su densidad. Hay libros que sostienen que este descubrimiento se hizo gracias a la casualidad. Es falso, puesto que nada en Física, en Medicina, ni en ninguna Ciencia, se descubre por casualidad. Podrá la suerte favorecer



**Fig. 1.**— William Crookes (1832-1919). Inventor del tubo de aire enrarecido que lleva su nombre y que sirvió para descubrir los electrones y los rayos X. Fué también el que en 1903 presentó el primer aparato de **"visión directa"** de los átomos, que llamó **"Spintariscopio"** (literalmente: visión de chispas). La ampolla de Crookes es el "eslabón" fundamental para los hallazgos de Lenard (corpúsculos catódicos o electrones), y de Röntgen (rayos X). Estos dos descubrimientos fueron los primeros que hicieron tambalear el dogma de la indestructibilidad del átomo, al mostrar que había algo más pequeño que salía del cátodo en forma de corpúsculos.

el que un descubrimiento se haga más rápidamente, pero nunca será el fruto de la casualidad, sino el resultado de pacientes y prolongados estudios de toda una gama de predecesores y en base a muchos trabajos y observaciones. La mera radiación dió margen a que se intensificaran las dudas que ya había hecho nacer la descripción de Lenard sobre los rayos que llevan su nombre y que también encontró estudiando la ampolla de Crookes. Para comprender la revolución que implicaban estos descubrimientos hay que recordar que hasta los tres cuartos del siglo todos los



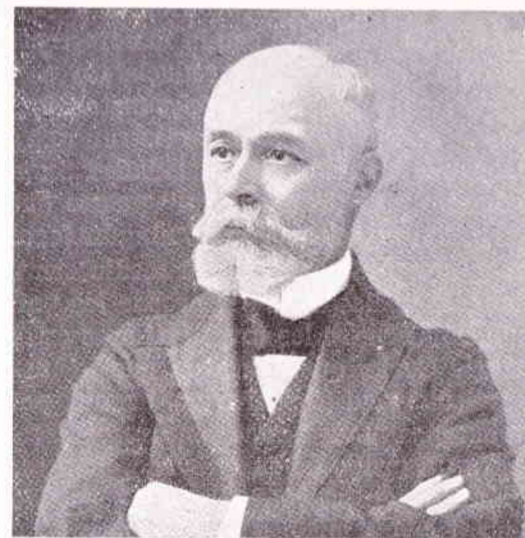


**Fig. 2.**— Henri Becquerel. Profesor de la Sorbona (París), Premio Nobel de Física (1852-1908). El 2 de marzo de 1896, presentó a la Academia de Ciencias de Paris una comunicación **"Sobre las radiaciones invisibles emitidas por los cuerpos fosforescentes"**, que constituye la base del descubrimiento de la radioactividad natural. Su hallazgo fué el punto de partida de los estudios que permitieron a Pierre y Marie Curie, llegar a aislar el radium y otros elementos que tenían radiación natural.

hechos parecían corroborar la teoría de Dalton, conocida por "Teoría de las proporciones múltiples" y más comúnmente como "Teoría Atómica de la Química". Si la corriente eléctrica, al atravesar una ampolla con gas enrarecido, daba lugar a que de ellos salieran los corpúsculos que descubrió Lenard, y esos rayos que descubrió Röntgen, había que suponer algo más pequeño que el átomo.

Los físicos de la Sorbona pensaron en la posibilidad de que los rayos X estuvieran en relación con la fosforescencia que caracterizaba al tubo de Crookes cuando producía rayos X y habiendo comprobado la que tenían en ciertas circunstancias los cristales de uranio, Henri Becquerel llega a demostrar que este mineral emite radiaciones que tienen particularidades semejantes a los rayos X y que llamó "radiación natural" puesto que la posee el uranio por sí mismo sin intervención de ningún factor extrínseco.

Es fácil imaginarse la sorpresa del medio científico y de la pléyade de estudiosos dedicados a comprobar las particularidades de la nueva radiación. Entre los investigadores estaban los esposos Pierre y Marie Curie, que pensaron que la nueva radiación no podía ser particularidad exclusiva del uranio, porque las propiedades de los cuerpos naturales suelen presentarse con caracteres generales para un grupo de substancias. Con esa idea se pusieron a experimentar en cuerpos simples pensando que debían encontrar algunos con las mismas propiedades.

Madame Curie, trabajando en la Escuela de Física y Química de París, trató de ver cuál podría ser la radioactividad de una serie de cuerpos, empleando el método que consiste en medir la corriente de débil intensidad que atraviesa el aire hecho conductor de iones por cualquier radiación. Era una tarea delicada pero que podía hacerse con gran exactitud gracias a la extraordinaria sensibilidad del admirable cuarzo de Pierre Curie. Por ese método de estudio, calificado por la propia Madame Curie, como la "química de lo invisible", puede dosificarse hasta la más pequeña cantidad de emanación que pueda surgir de un cuerpo dado y pudo llegar así al descubrimiento del radium.

La prueba de la existencia de substancias que tienen la particularidad de emitir radiaciones fué el golpe de gracia a la teoría de Dalton. Todo lo afirmado por ella era cierto puesto que estaba basado en la comprobación de los hechos, pero sólo constituían una parte de la verdad dado que se referían a la parte externa del átomo sin haber sospechado siquiera que en su interior había algo más complejo, cuyo estudio permitiría llegar a





Recordamos las palabras con que termina su discurso Pierre Curie, en la Academia de Ciencias de Stockolmo, el año 1903, después de recibir el Premio Nobel para la Física:


Pierre Curie.

"Puede preguntarse si la humanidad tiene ventajas en conocer los secretos de la naturaleza, si está preparada para aprovecharlos para la paz, o si el conocimiento de algunas novedades no le podría ser perjudicial. El ejemplo de los descubrimientos del hombre que ha instituído este premio es característico; los explosivos poderosos han permitido a los hombres realizar trabajos admirables. Pero constituyen también un terrible medio de destrucción «en la mano de los grandes criminales que arrastran a los pueblos hacia la guerra». Soy de los que piensan que la humanidad sacará más bien que mal de los nuevos descubrimientos."


Marie Curie.


Irène Joliot-Curie.

**Irene Curie**, Premio Nobel de Química, ha tenido, junto con su marido, Federico Joliot, una activa participación en todos los descubrimientos relativos a la radioactividad y a la energía atómica.

**Fig. 3.**

... hoy y las maravillas que sospechamos para un porvenir no lejano.

La emisión de radiaciones suponía una actividad nuclear especial que atrajo la atención de todos los investigadores del fin del siglo XIX. Empieza nuestro siglo con una serie de descubrimientos y comprobaciones de hechos, que dan lugar a constantes renovaciones de conceptos que el ingeniero Walter Hill expondrá con la preparación y didáctica que lo han llevado a ser la persona más caracterizada en estudios atómicos de nuestro medio. Siguiéndolo podrán ustedes apreciar la forma cómo se ha ido progresando hasta llegar a conocer todo lo que hoy sabemos sobre el complejo que constituye un átomo.

Insistiendo en mi papel de presentarles a ustedes los eslabones más importantes de la cadena de descubrimientos que unen el de Becquerel al de Hahn y Strassman de la fisión atómica, me tocaría recordarles que a poco de comenzar nuestro siglo, en Inglaterra, un hombre, muerto hace pocos años, y al que se le puede llamar el "marcador de ruta" en todos los progresos de los descubrimientos atómicos realizados en las tres primeras décadas del siglo, Lord Rutherford, consigue transformar partículas alfa del radium en helio.

**Comenzó el siglo que vivimos con numerosas interrogantes que se referían a la actividad de los átomos y a la energía que podía haber en su interior. Estas inquietudes llevaron a una legión de trabajadores a comprender que lo que hasta entonces se conocía era sólo la periferia del átomo, lo que explicaba sus propiedades desde el punto de vista químico.**

**Pocos años fueron necesarios para que Lord Rutherford (inglés) llegar a obtener el sueño de los alquimistas de la edad media pero con otro fin: aquéllos buscaban transformar los cuerpos para obtener oro, los estudiosos de nuestro siglo pretenden llegar a obtener energía y manejarla a voluntad.**

Aston (inglés) mostró que el mismo cuerpo, con las mismas propiedades químicas podía separarse en dos substancias que eléctricamente reaccionaban de manera distinta. Esos cuerpos iguales, pero con algo distinto en su interior se llamaron *isótopos*. Es decir, que el concepto de que el átomo está formado por partículas, no alcanzaba para explicar el nuevo hecho. Había que buscar por el lado de las cargas eléctricas y se le atribuyó la forma de sistema planetario que es la primera que pretende explicar la estructura compleja del núcleo.

El átomo, decían Rutherford y Bohr (dinamarqués), tiene un pequeño núcleo cargado positivamente alrededor del cual giran corpúsculos más chicos cargados negativamente, que son los electrones.

Pero a pesar de lo complicado que parecería el complejo nuclear de Bohr y Rutherford, nuevos estudios fueron mostrando





**Fig. 4.**— Lord Rutherford (inglés), el hombre al que puede llamarse el "marcador de ruta" en el progreso atómico durante los treinta primeros años del siglo XIX.

su incapacidad para explicar ciertas adquisiciones, y fué necesario que la teoría atómica nuclear se fuera modificando en la forma que explicará el ingeniero Hill. Al bombardear con los rayos que emanan del radium, el mismo Rutherford, en 1919, transforma el nitrógeno en oxígeno. Conseguida la primera desintegración atómica y la transformación de un elemento en otro, los conocimientos sobre el núcleo y su naturaleza fueron mejorando.

Se aislaron los electrones, partículas negativas, las positivas o protones; y se vió que había algo desprovisto de carga eléctrica, que era lo que constituía la masa de cada núcleo, los neutrones. Para romper los núcleos se usaban partículas con gran energía, a pesar de lo cual no siempre se podía vencer la barrera eléctrica.

Los adelantos de la técnica permitieron construir grandes aparatos destinados a dotar de gran potencia a los proyectiles dedicados al bombardeo; pero no se consiguió pasar la barrera eléctrica.

El ingeniero Hill les mostrará la evolución de esta artillería.

Los bombardeos con partículas eléctricas, electrón (—), protón (+) y deuterón, sólo conseguían transmutar elementos simples. La energía que resultaba de esas rupturas atómicas era poca porque las fuerzas eléctricas de los átomos hace perder potencialidad, lo que reduce la probabilidad del choque a alta



Fig. 5.—Federico Joliot Curie. Profesor del Colegio de Francia, Miembro del Instituto, Premio Nobel de Química. Jefe de los Laboratorios de Estudios Atómicos de Francia.

Hasta 1934 se pensaba que los elementos formados en las transmutaciones eran átomos estables existentes en la naturaleza. Los esposos Joliot-Curie demostraron la posibilidad de producir átomos radioactivos que no existían naturalmente. Posteriormente, en 1938, encontraron ciertas particularidades en los radioelementos encontrados por Fermi. En seguida de la descripción de la física del núcleo del átomo de uranio por Kahn y Strassman, probó objetivamente esa fragmentación atómica y mostró que el fenómeno iba acompañado de una gran producción de energía y de una considerable emisión de neutrones. Recientemente (1948) ha construído una nueva pila completamente original.

**"La explosión de Hiroshima nos reveló el extraño poder de la energía atómica. Estoy convencido que a pesar de esta aparición aterradora, esta nueva conquista de la ciencia traerá a la humanidad más bien que mal."**—1946.
Federico Joliot Curie.





Fig. 6.—Enrique Fermi (italiano). Uno de los más serios investigadores sobre la energía atómica. El primero que utilizó el bombardeo con neutrones y quizás uno de los principales artesanos de la pila y de la bomba atómica.

velocidad entre los proyectiles y el blanco. Aunque el choque llegue a realizarse, la fuerte repulsión entre la carga eléctrica del proyectil y la del núcleo forma una "barrera de potencial" que dificulta la penetración del primero en el segundo.

Se empezó a tratar de romper los átomos con la partícula neutra: el *neutrón.*

Se consiguió la transmutación de gran número de elementos, pero hasta 1934 se trataba de elementos simples, con núcleos estables y cuerpos ya conocidos. En ese año Federico Joliot e Irene Curie, consiguieron romper los núcleos de manera que un cuerpo simple se transforma en cuerpo radioactivo, es decir, obtuvieron

*isótopos radioactivos* que conservaban la actitud radiante debida a su desarreglo nuclear que duraba un tiempo variable. Fué un descubrimiento que tuvo gran repercusión científica y que motivó que se le discerniera el premio Nobel a sus autores. Desde el punto de vista médico dió lugar a que en el oscuro horizonte de la curabilidad del cáncer luciera una estrellita que no tardó en perder luz al comprobarse que los isótopos radioactivos no permitían curaciones que no se obtuvieran con las radiaciones ya empleadas.

Sigamos analizando eslabones, sobre los que no me detengo puesto que lo harán los ingenieros. Poco después del descubrimiento de la radioactividad artificial por los Curie, un físico italiano que debía ser ulteriormente uno de los más importantes en la tarea de preparación de la bomba atómica, Fermi, se puso a estudiar materiales pesados y observó que al bombardear con neutrones el uranio 238 se franqueaba la "barrera de potencial" produciéndose un fenómeno extraordinario, *gran cantidad de radiaciones, prodigioso calor,* quedando como residuo una serie de elementos con fuerte radiación artificial.

**En este período que comenzamos a tratar, no sólo se cambió un cuerpo en otro, sino que se llega a más: despertar actividad en los núcleos de los cuerpos simples; lo que los hace radioactivos temporalmente. Este descubrimiento del matrimonio Joliot-Curie (franceses) es seguido por Fermi (italiano) que obtiene la mayor energía, calor y cantidad de cuerpos radioactivos que se había obtenido hasta entonces.**

**Hahn y Strassman (alemanes) y casi al mismo tiempo los Joliot-Curie, describen la fisión o partición del átomo y la explosión en cadena. Descubrimiento sensacional que marca una época, puesto que no hay duda que la combustión nuclear alcanzará en el futuro la repercusión que ha tenido la combustión química.**

No se supo apreciar bien el fenómeno, ni la naturaleza de esos cuerpos y los describió en grupos. Quizá ustedes recuerden haber leído en la prensa, tres o cuatro años antes de la guerra, que al físico italiano Fermi se le otorgó el premio Nobel de Física por el descubrimiento de los cuerpos transuranianos.

En Alemania dos investigadores, Hahn y Strassman, estudiando estos cuerpos, vieron que no se trataba de una *transmutación del uranio,* sino de la *fisión o partición uraniana.* Los Joliot-Curie repitieron en seguida la experiencia y se comprendió perfectamente este fenómeno de la partición uraniana que ustedes van a tener el agrado de oír explicar al ingeniero Cacciapuoti, de la Universidad de Trieste, y que se encuentra en Montevideo, temporariamente designado por el Centro de Cooperación Científica para América Latina de la U. N. E. S. C. O.

Hahn y Strassman, en Alemania, y los Joliot-Curie en el Colegio de Francia, mostraron que se trataba de un fenómeno





**Fig. 7.**— Otto Hahn (alemán). Estudió y codescubrió la fisión del uranio a fines del año 1938.

extraordinario porque nunca se había visto una producción *tan grande de energía y calor y de algo más... de liberación de neutrones.* Era una época nueva, pues la más pequeña masa, *el núcleo,* era capaz de producir la máxima energía, calor y proyectiles (es decir, neutrones) que a la vez podían provocar el mismo fenómeno en otros núcleos. Es lo que se llamó *"Desintegración atómica en cadena",* complejo fenómeno bien comprensible cuando se explica con la didáctica de quien se lo va a describir.

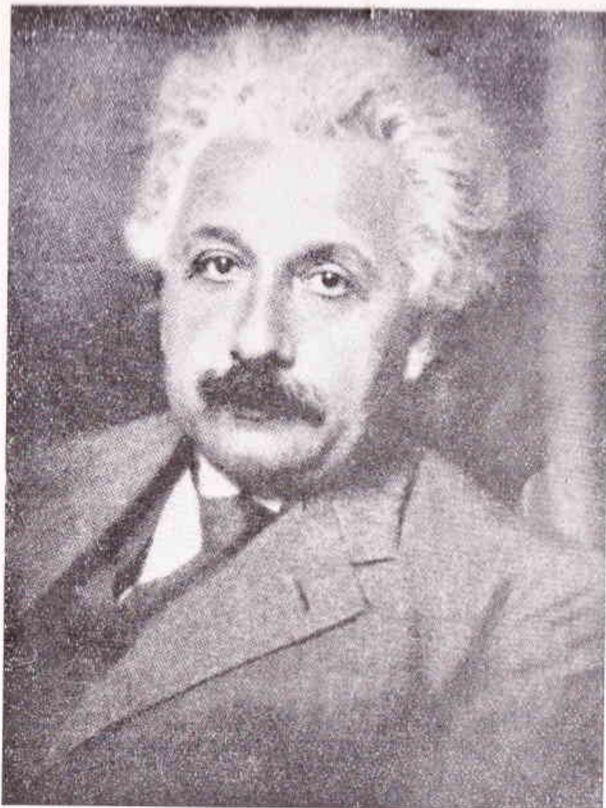


**Fig. 8.**— Albert Einstein, que en su teoría sobre la relatividad estableció por primera vez la equivalencia entre la masa y la energía.

Llega la guerra; en el mundo científico lo que se sabe es que los átomos de ciertos minerales pesados, en ciertas circunstancias, y al ser atacados por neutrones, estallan provocando la más grande energía y siendo a su vez productores de neutrones capaces de provocar el mismo fenómeno en otros átomos. Es decir, que por este camino atómico se podría encontrar el mayor agente de muerte y la más peligrosa arma.

Las dificultades eran muchas y ya no es posible ir mostrando eslabones en la cadena de descubrimientos porque éstos se sucedían en distintos caminos en laboratorios destinados a distintos estudios bajo el mayor secreto.





**Fig. 9.**— Extraordinaria reunión de algunos de los principales artesanos de la física nuclear. De izquierda a derecha (adelante): O. Hahn, Lord Rutherford, Lise Meitner y Stefan Meyer; (atrás): el segundo es H. Geiger y el tercero es J. Chadwick.

El éxito alcanzado constituye la mayor demostración de lo que puede el trabajo en equipo. Es que cada uno hace lo que mejor sabe tratando de marchar por un determinado camino, bajo la dirección de sabios que son los que van orientando las investigaciones. Esos equipos han sido internacionales, puesto que se formaron no sólo con sabios americanos, ingleses y canadienses, sino también con muchos provenientes de las naciones en guerra con los aliados.

---

Todos los descubrimientos que acabamos de pasar en rápida revista, permitieron obtener un mineral cuyo núcleo es capaz de estallar en cuanto llega a tomar una masa crítica con ciertas particularidades. Su explosión provoca: 1º) una onda de presión inigualada; 2º un gigantesco desprendimiento de calor que volatiliza todo lo que está próximo; 3º) una producción extraordinaria de radiaciones que alcanza muchos kilómetros a la redonda, y 4º) gran emisión de neutrones que determina una gran radioactividad temporaria, sea en los elementos de la superficie terrestre, transformándolos en radioactivos artificiales, sea porque alcanzan directamente al organismo, donde suelen provocar fenómenos muy complejos.

El Prof. Alfonso Frangella, mi compañero en la Dirección del Instituto de Radiología y Ciencias Físicas, que dirige además la sección de estudios atómicos del mismo, mostrará los peligros biológicos de la energía atómica.

No todo debe ser pesimismo en la medicina nuclear y hay quien sostiene que: **"Si muchos son los desastres que esos desarreglos nucleares en masa provocan en el organismo, grandes son las esperanzas en los beneficios que pueden sacarse desde el punto de vista médico de todos los descubrimientos de la química nuclear y de la física corpuscular. Hay biólogos y médicos que esperan una edad de oro en la que las fronteras de la enfermedad sean vencidas, hay quien habla de disminuir el gasto celular que acompaña a la vida"**. Esperanzas que han nacido sin base científica sólo como contrapeso a la enorme angustia que ha despertado tanta destrucción.

En cuanto al empleo de la energía atómica para la paz, también son grandes los horizontes. La explosión nuclear disciplinada hace entrever posibilidades que mejorarían mucho las condiciones de vida. Hay en el momento actual legiones de sabios e investigadores cuya preocupación es emplear esa energía en fines pacíficos y humanos. Esperemos que puedan reportar todo lo que el Mundo espera de la "era atómica".



## LAS ILUSTRACIONES QUE SIGUEN CORRESPONDEN A LOS APARATOS LLAMADOS ROMPEATOMOS

La primera tentativa exitosa se obtuvo con fuentes de energía natural radioactiva, por Rutherford, pero fué necesario ir mucho más lejos, y así surgieron las fuentes artificiales, más poderosas y menos costosas, aunque muchísimo más complicadas. Se crearon por primera vez, en el laboratorio Cavendish, por Cockroft y Walton, en 1932, el acelerador atómico o rompeátomos, empleando un transformador de trescientos cincuenta mil voltios amplificados hasta un millón; luego vinieron los llamados generadores electrostáticos de Van de Graaf y casi en seguida los formidables ciclotrones, sincrotrones, etc., cuya energía puede llegar a setenta millones de electrones voltios y aun más.

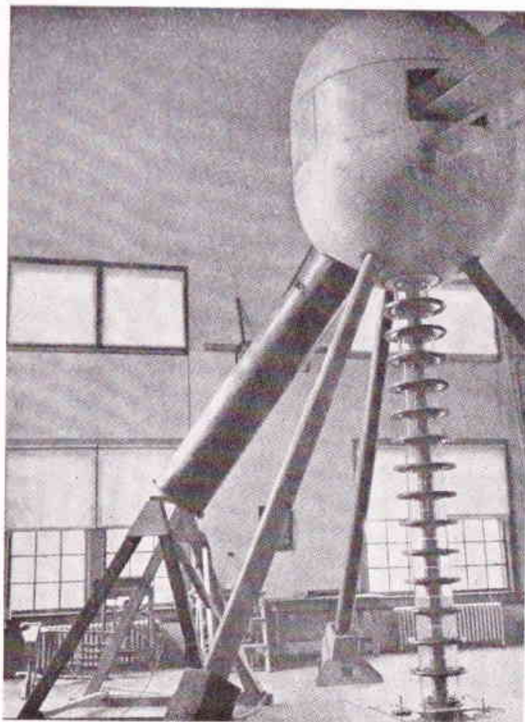


**Fig. 10.**— Generador Van de Graaf.
**Bombardeador de átomos datando de 1931.**



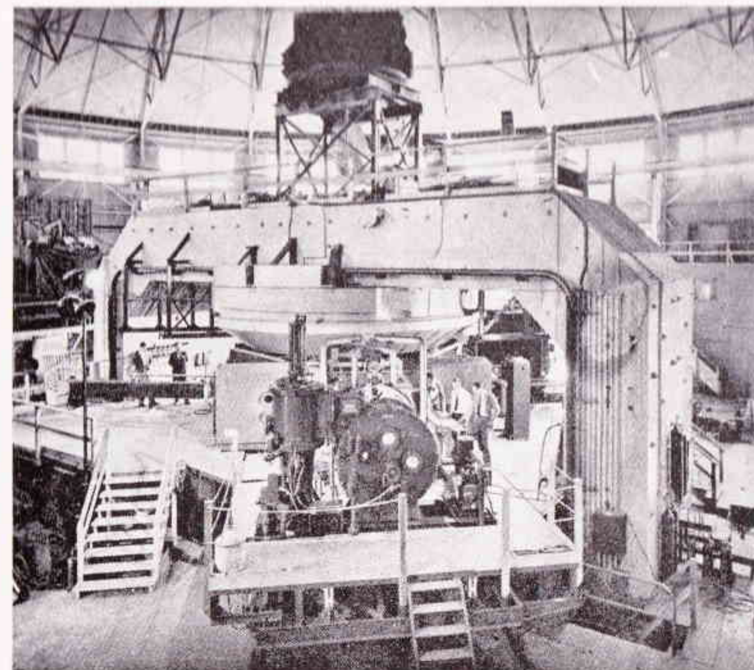


**Fig. 11.**— El ciclotrón más grande del mundo. Universidad de California. El marco superior es un imán de 4.000 toneladas que acelera las partículas que se encuentran en un aparato circular situado por debajo hasta que tienen velocidad y energía suficientes para bombardear los átomos. Es uno de los más eficaces **cañones** atómicos.

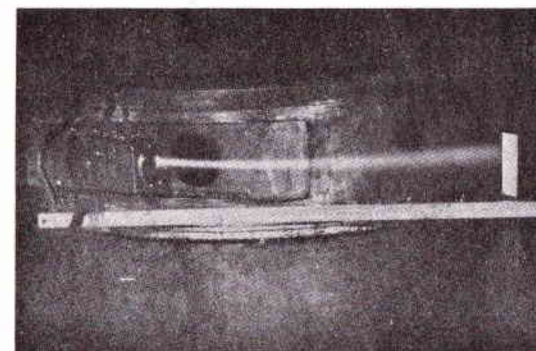


**Fig. 12.**— Rayo de deuterones **(proyectiles)** de diez millones de eV, producido por el ciclotrón de Michigan.

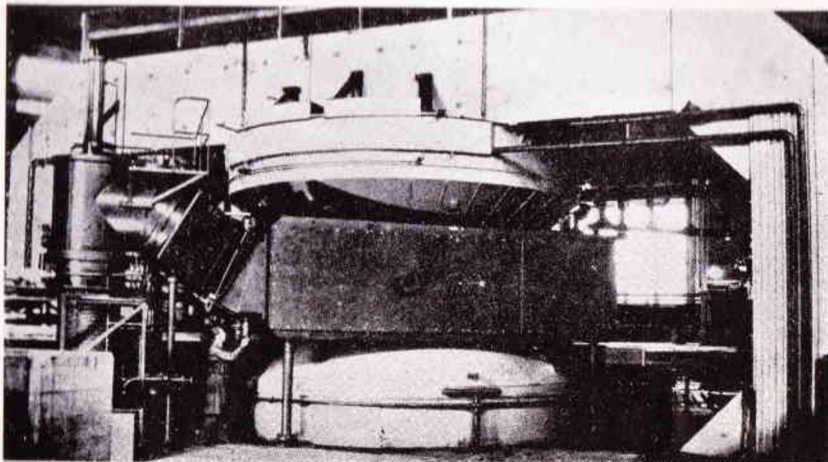
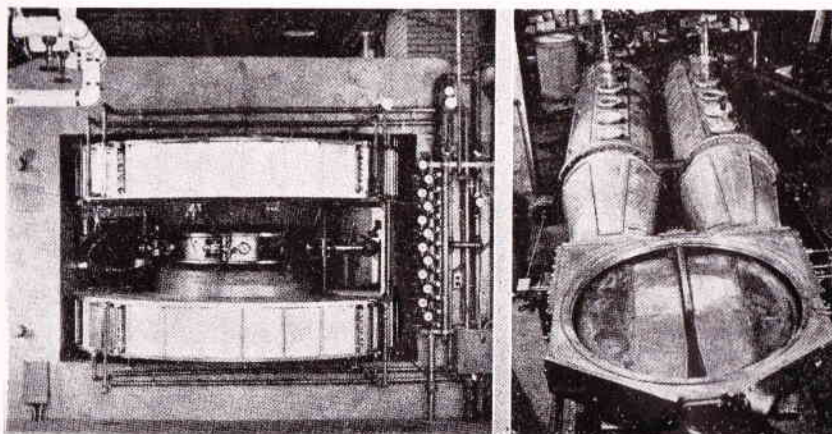


**Fig. 13.**— Detalle del ciclotrón de Berkeley.



A B

**Fig. 14.**— Elementos fundamentales del ciclotrón.
**A**: Magneto. **B**: Acelerador de partículas.



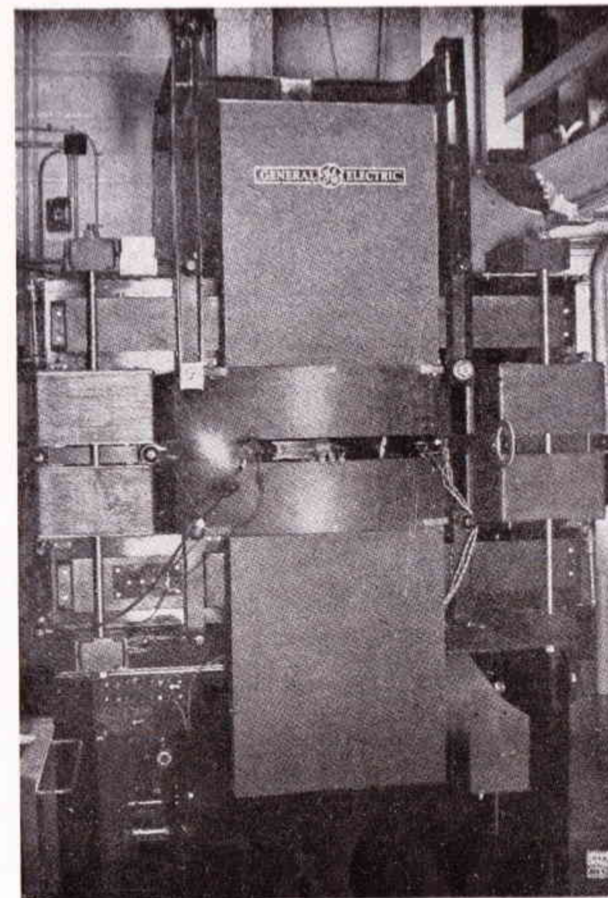



**Fig. 15.**— El sincrotrón de 70 MeV.
Uno de los más recientes **cañones** atómicos.

# EL ATOMO

## Su composición. Sus transformaciones

**Prof. Ing. WALTER S. HILL** *

### Estructura discontinua de la materia. Concepto básico de la física nuclear

La física nuclear, proyectada en el primer plano del interés público, por la fuerza espectacular de la explosión atómica, es el más reciente capítulo de la física.

Sin embargo sus orígenes no son nuevos. Puede afirmarse que a su formación concurrieron resultados experimentales y teóricos cosechados a ritmo creciente, desde los albores de la ciencia, en los más variados campos de la investigación.

El conocimiento progresivo del universo realizado por el esfuerzo analítico combinado de las ciencias experimentales y teóricas, representadas por la mecánica, la óptica, la química, la termodinámica, el electromagnetismo y la atomística, condujo lentamente al poderoso sistema de investigación que constituye hoy la física nuclear.

En sus dominios, la materia y la energía son los principales actores, caracterizando a todas esas misteriosas partículas ultramicroscópicas que se llaman electrones, neutrones, protones, etc., inaccesibles directamente a nuestros sentidos, salvo cuando se presentan en forma de cuantiosas agregaciones, constituyendo los cuerpos de nuestro mundo sensible.

---

* Director del Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería de Montevideo. Catedrático de Física de la Facultad de Humanidades y Ciencias.

Las combinaciones de estos átomos, cuyo estudio pertenece a la química, constituyen las moléculas que caracterizan a los diversos compuestos químicos. Así, por ejemplo, dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno son suscep-

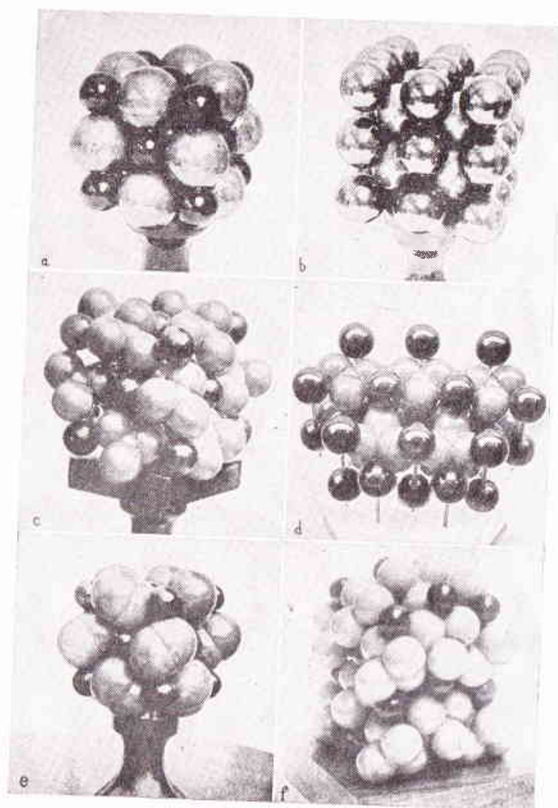



Fig. 16.— Primer enfoque del discontinuo. Modelos representando algunas moléculas. Las esferas, son los átomos. a) Cloruro de sodio. b) Cloruro de cesio. c) Calcita, carbonato de calcio. d) Aragonita, carbonato de calcio. e) Pirita, sulfuro de hierro. f) Sulfato de calcio.

tibles de combinarse formando una molécula del cuerpo compuesto que se denomina agua. Además, y esto es muy importante, la combinación de estos tres átomos se produce con liberación de energía. Se dice que la formación de la molécula de agua es






Fig. 17.

exoenergética. Los átomos que entraron en la combinación perdieron energía interna que apareció en el espacio circundante en forma de calor, o sea energía térmica, que no es otra cosa que aumento de agitación de las moléculas vecinas.

A las apariencias más diversas pueden dar lugar las combinaciones de los 96 átomos conocidos. Así el agua oxigenada y el agua común están formadas por diferentes proporciones de los mismos átomos hidrógeno y oxígeno. La glucosa, el almidón y la celulosa están formados por combinaciones distintas de átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno. El diamante y el grafito del lápiz son dos tipos de agrupaciones del mismo átomo de carbono, con apariencias bien distintas.

## Componentes del átomo

tro imaginario supermicroscopio, observaríamos que cada átomo constituye un verdadero mundo, un diminuto sol rodeado de una pléyade de planetas que giran velozmente a su alrededor, en órbitas concéntricas. El sol de este mundo microscópico es el *núcleo* del átomo. Los planetas son los *electrones*. Éstos son mucho más pequeños que el núcleo y distan de él distancias enormes, relativamente. En términos generales, el átomo está construído con un plan similar al del sistema solar.

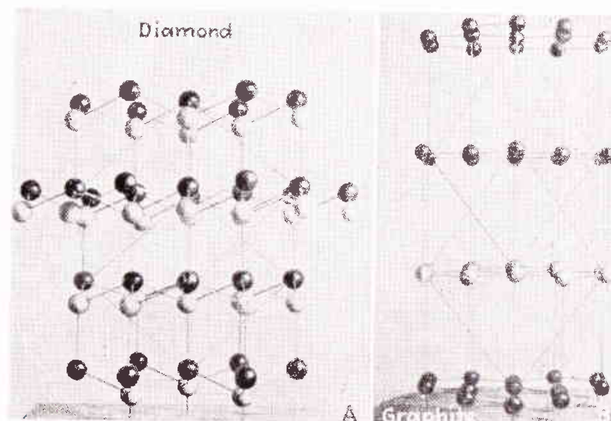



Fig. 18.— Agrupaciones atómicas del carbono. Diamante y grafito.

Ahondemos ahora un poco más en nuestra descripción del átomo. Los electrones, o sean los pequeños planetas que giran alrededor del núcleo están dotados de masa, vale decir, *pesan*. Su masa es la más pequeña conocida en la física de los corpúsculos. Para formar un gramo se precisaría la cantidad fabulosa de electrones expresada por el número *uno* seguido de 28 ceros. El electrón, además de ser el corpúsculo planetario común a cualquiera de los 96 átomos conocidos, se caracteriza por la importantísima propiedad de ser el ingrediente que constituye el flúido eléctrico. La corriente eléctrica no es otra cosa que un flujo de electrones libres a través del conductor. Por tanto, el electrón está dotado, además, de carga eléctrica. De acuerdo con las definiciones convencionales de electrotecnia, su carga es negativa.



En estado normal, cada uno de los 96 elementos tiene un cortejo de electrones cuyo número caracteriza a cada uno de esos elementos. El número normal de electrones planetarios en cada átomo, constituye su número atómico. Así, por ejemplo, el hidrógeno, con un solo electrón planetario, tiene el número atómico *uno*; el cobre, con 29 electrones planetarios, tiene el número atómico 29; el uranio, que es el elemento natural que tiene más electrones planetarios, tiene el número atómico 92. Cuando un átomo está electrizado, tiene un número de electrones anormal, mayor o menor que su número atómico. Se dice entonces que el átomo está ionizado y a tal átomo se le designa con el nombre de ion.

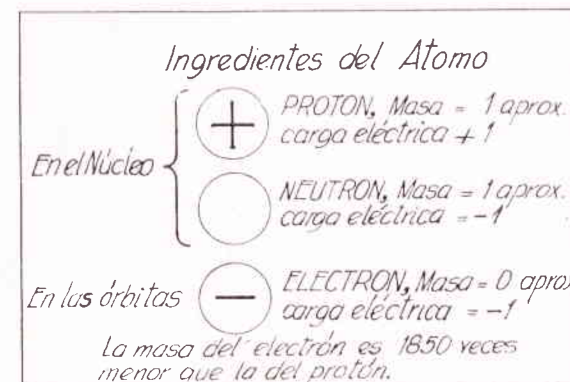



Fig. 19.

Cuando el átomo pierde todos los electrones planetarios, queda reducido al núcleo, que entonces se suele designar con el nombre de *nucleón*.

Los números atómicos constituyen, además, la entrada numérica a la tabla periódica de los elementos.

En el *sol* del sistema planetario atómico que estamos describiendo, es decir, en el núcleo, se condensa la mayor parte de la masa o sea de la materia que constituye el átomo.

Por ejemplo, el núcleo del hidrógeno, llamado también *protón*, tiene una masa casi dos mil veces mayor que la del electrón.

Además el núcleo, en razón del equilibrio eléctrico, tiene una carga eléctrica positiva, igual en valor absoluto a la suma de las cargas de todos los electrones que forman su cortejo. Los núcleos de los 96 átomos fundamentales son diferentes: tienen todos carga eléctrica distinta.

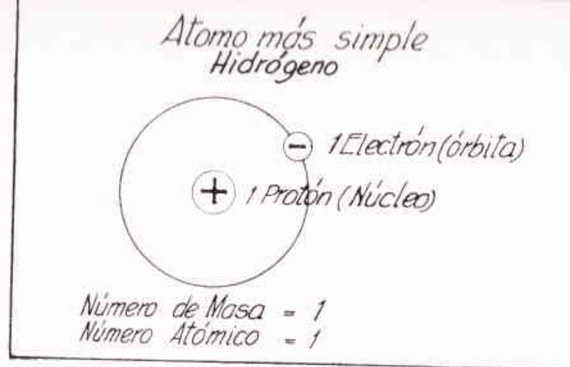



Fig. 20.

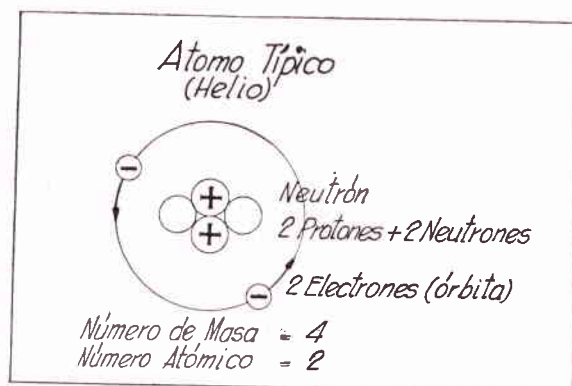



Fig. 21.




Fig. 22.



verso que es un átomo, tomemos el ejemplo del átomo de cobre. El número de núcleos contenidos en un centímetro cúbico de cobre alcanza a la fantástica cifra de 79 seguido de 21 ceros.

Pero veamos ahora la enorme dispersión de los núcleos en la materia. La separación de dos núcleos *vecinos* en una masa de cobre es 20.000 veces mayor que el diámetro del núcleo. Quiere decir que entre uno y otro núcleo hay una distancia mayor, comparativamente a su tamaño, que la existente entre la tierra y la

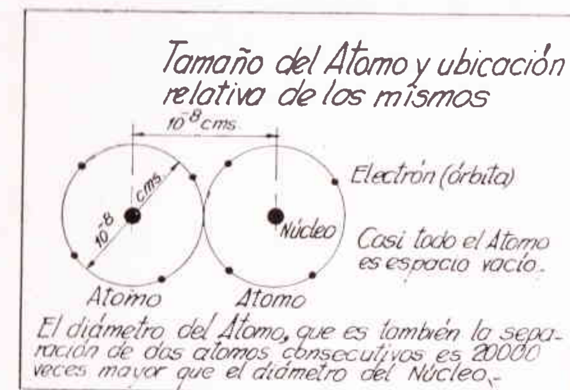



Fig. 23.

luna. Este resultado sorprendente, nos muestra claramente el engaño de nuestros sentidos. El cobre metálico nos da una completa sensación de materia compacta, sin solución de continuidad, y la realidad es, en cambio, que la materia se encuentra concentrada en pequeñísimos núcleos relativamente muy distantes unos de otros. Si esos núcleos se concentraran de modo que se tocaran unos con otros, la masa resultante tendría una densidad fantástica. Una pelota de tennis con esta densidad, pesaría más de 100 millones de toneladas.

## Energía almacenada en la materia

Antes de seguir adelante en esta descripción elemental del átomo, diré dos palabras sobre su propiedad más notable: me refiero a la enorme energía almacenada en su complicado y minúsculo mecanismo.

concentrada en la materia es proporcional a su masa, o, en otras palabras, que la masa es una forma de la energía. Se obtiene numéricamente esta energía multiplicando la masa por el cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío. Ahora bien, la masa del átomo se distribuye entre la masa de los electrones planetarios y la del núcleo, estando en éste concentrada la mayor parte de dicha masa.

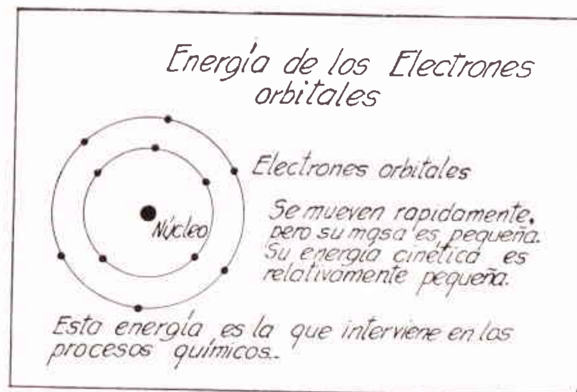



Fig. 24.

Resulta entonces, de acuerdo con Einstein, que la energía del átomo está distribuída proporcionalmente a las masas entre los electrones y el núcleo, pero debido a su masa, en éste también se concentra la mayor parte de la energía. Por ejemplo, en el hidrógeno, la energía gravífica del núcleo o protón es casi dos mil veces mayor que la del electrón en reposo.

Los cálculos revelan que la energía atómica de la materia es enorme. Aplicando la citada ecuación de Einstein a un kilogramo de materia, sea esta granito, carbón, madera o agua, la energía liberada, suponiendo que toda esta materia se transformara en energía mecánica, térmica o eléctrica, sería de 25.000 millones de kw. hora. La gran usina hidroeléctrica del Boulder Dam en los EE. UU., una de las mayores del mundo, en un año, trabajando a plena carga, sólo produciría el 40 % de esa energía.

Sería imposible en este breve espacio, siquiera pasar revista a la larga cadena de evidencias experimentales y teóricas que



gadores tienen una continua verificación de sus concepciones en la coherencia que debe existir entre ellas y los nuevos resultados experimentales.

Energía Nuclear
Núcleo del Helio
La energía de acoplamiento se opone a la separación de protones y neutrones
La energía nuclear TOTAL de 1 Kg. de Materia, bastaría para mantener encendida una lámpara de 100 Watt durante 28.5 millones de años!
Cálculo
Ecuación de Einstein $E = mc^2$ Watt seg.
masa $m = 1$ Kg
Velocidad de la luz $3 \times 10^8$ m/seg
$E = 1 \times (3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{16}$ Watt seg.
$t = \frac{9 \times 10^{16}}{100} \frac{\text{Watt seg.}}{\text{Watt}} = 9 \times 10^{14}$ seg. $= 28.5 \times 10^6$ años

Fig. 25.

## Ingredientes del núcleo

De acuerdo con una idea original de Heisenberg, hoy se supone que el núcleo está a su vez formado por una composición o asamblaje de *neutrones* y *protones*. Estos últimos no son otra cosa, como dije más arriba, que núcleos de hidrógeno sin su cortejo de electrones planetarios. Por tanto, los *protones* son átomos ionizados o iones de hidrógeno: su carga es electropositiva, de igual magnitud que la del electrón, pero de signo contrario. En el núcleo hay tantos protones como electrones tiene su átomo normal no ionizado.

Los *neutrones*, en cambio, son partículas desprovistas de carga eléctrica pero dotadas de masa: su peso es casi igual al del protón o núcleo de hidrógeno.

Resumiendo, los protones contribuyen en el núcleo con carga eléctrica positiva y con masa: los neutrones sólo con masa.

Como ejemplo para ilustrar sobre las diversas formas de agruparse de estas partículas elementales, examinemos los átomos

geno, tiene un solo electrón planetario y su núcleo se compone exclusivamente de un protón. El núcleo de este átomo no contiene neutrones.

El átomo de cobre tiene 29 electrones planetarios y su núcleo tiene 29 protones y 34 neutrones. El átomo de uranio tiene 92 electrones planetarios y su núcleo tiene 92 protones y 146 neutrones.

La suma de las partículas que forman el núcleo atómico, es decir, la suma de los protones y de los neutrones contenidos en él, se llama *número de masa* del átomo, y expresa, en las unidades de masa, llamadas unidades atómicas (1) la masa aproximada del núcleo.

Esto se debe a que los protones y los neutrones tienen aproximadamente la misma masa (ver cuadro de *proyectiles* atómicos en pág. 39).

Este número tiene, además, la particularidad de ser el número entero más próximo al peso atómico de la substancia, tal como se define en química.

El núcleo de hidrógeno, formado por un solo protón y ningún neutrón, tiene número de masa 1. El peso atómico exacto es de 1,00817 unidades de masa.

El cobre con 29 protones y 34 neutrones tiene número de masa 63. El uranio tiene 92 protones y 146 neutrones, tiene número de masa 238. Su peso atómico exacto es 238.088 unidades de masa.

Existen átomos que tienen el mismo número atómico pero número de masa distinto. Quiere decir que tienen el mismo número de electrones planetarios, y sus núcleos el mismo número de protones. En cambio el número de neutrones es distinto. Estos cuerpos se dice que son *isótopos*. Su principal propiedad es que son químicamente iguales. Esto se debe a que las propiedades químicas de afinidad y valencia dependen sólo del número de electrones planetarios, que es igual en los átomos isótopos.

Por ejemplo, el hidrógeno pesado, o deuterón, isótopo del hidrógeno común, tiene el mismo número de electrones planetarios y de protones que éste, pero en cambio, su núcleo tiene además un neutrón. El número atómico es el mismo: *uno;* pero su

(1) Una unidad atómica de masa $= \frac{2,655}{16} \times 10^{-23}$gr.



número de masa es mayor en una unidad, pues ahora las partículas del núcleo son dos, un protón y un neutrón.

Teniendo ambos isótopos las mismas propiedades químicas, es lógico también suponer que el hidrógeno pesado pueda combinarse con el oxígeno para formar agua. En efecto, esta combinación existe: es el *agua pesada* a que tanto se ha aludido con motivo de la bomba atómica.

Una consecuencia importante es que en los fenómenos químicobiológicos, todos los isótopos de un mismo átomo actúan en forma idéntica, siendo esto una de las bases de la técnica de los *trazadores*, de tanto interés en física, química, biología, etc.

El uranio ordinario, el que más abunda en la naturaleza, tiene peso atómico 238. En cambio, el uranio que presumiblemente constituye la carga explosiva de la bomba atómica, de la que nos hablará el profesor Cacciapuoti, es el isótopo con número de masa 235, cuya abundancia es sólo 0.7 % de la del anterior. Los números de masa son las cifras que distinguen a los isótopos.

Por eso se dice para el uranio: U. 238, U. 235, etc., señalando así los números de masa.

## Transmutación del átomo

Es posible, tal como lo demostró Rutherford por primera vez en el año 1919, provocar transmutaciones a partir de elementos o átomos primitivos. Se abrió así una perspectiva nueva a la más fantástica de las alquimias. Transformar un metal en otro más noble o más rico; el sueño de los alquimistas, estaba al alcance de la ciencia.

Se vió entonces que la reconocida estabilidad del átomo, sobre la que se fundaba la química clásica, era sólo una consecuencia de la pequeñez de la fuerza con que se actuaba en los procesos químicos y físicos ordinarios.

Un primer indicio se tuvo al estudiar la radioactividad. Se comprobó que la transformación espontánea de la materia radioactiva se producía en forma invariable, independientemente de las condiciones químicas o físicas a que se sometía, por extremas que fueran, dentro de las posibilidades usuales. Se pensó entonces, que este hecho se debía a que la radioactividad era un fenómeno radicado en lo más profundo del átomo, o sea el núcleo, invulnerable a los clásicos agentes químicos y físicos.

En efecto, éste se encuentra sólidamente atrincherado en el triple escudo de su *pequeñez*, su *dispersión* en la materia y su *barrera de potencial.*

El procedimiento para eludir esas defensas del núcleo, es el de dispararle nubes de proyectiles o partículas animadas de velocidades enormes, comparativamente con las velocidades de las partículas excitadoras, usadas en la química ordinaria. La pequeñez y la dispersión del núcleo en la materia, actúan disminuyendo el rendimiento de tiro de las partículas proyectiles.

En cambio la barrera de potencial actúa como una cintura defensiva exterior, que desvía los proyectiles o partículas dotadas de carga eléctrica.

Cuando una de esas partículas o proyectiles rompe las tres defensas y logra un impacto con un núcleo, los resultados pueden ser muy variados, dependiendo de la velocidad o energía cinética de la partícula proyectil, de su masa, del núcleo golpeado, etc. Puede resultar un choque elástico, que sólo altera la energía cinética de cada partícula en juego, o pueden producirse *transmutaciones*. El núcleo golpeado se transforma en otro núcleo y la partícula proyectil se transforma en otra partícula, y a veces hay también emisión de una radiación similar a las luminosas. Los proyectiles utilizados por la artillería atómica son muy variados, dependiendo su elección del tipo de ciudadela que se pretenda atacar o del efecto que se espera obtener. Se dice que hay *captura* cuando el proyectil queda incorporado en el núcleo formado.

Es muy común utilizar como proyectiles, núcleos atómicos lanzados a gran velocidad. Son muy utilizados los *protones*, los *deuterones* y los *heliones*, respectivamente núcleos de hidrógeno liviano y pesado y de helio. Los heliones o núcleos de helio, cuando actúan en forma de proyectiles, son designados con el nombre de rayos alfa. El radium, por ejemplo, se desintegra espontáneamente, emitiendo, entre otras partículas, rayos alfa.

También se utilizan como proyectiles, electrones, o sean cargas eléctricas negativas, y diversas radiaciones penetrantes: *rayos X*, *rayos gamma* y *rayos cósmicos*.

Pero los proyectiles más efectivos hasta el presente son los *neutrones*. Estas partículas carecen de carga eléctrica, por tanto no son influenciadas por la barrera de potencial. Como consecuencia, tienen una gran penetración y una gran eficacia de tiro. Además tienen una gran susceptibilidad de ser capturadas.

Fermi hizo una importante observación a partir de la cual precipitó la historia que culminó con la bomba atómica. Los neutrones lentos o de poca energía cinética, son los más eficaces, o sea los más fácilmente capturados por otros núcleos.



Cuadro indicando los "proyectiles" atómicos más usados

PROYECTILES CORPUSCULARES

| NOMBRE | SIMBOLO | ESQUEMA | CARGA | MASA GRAMOS | MASA U. de M. | ARTILLERIA ATOMICA |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PROTON | $_1H^1$ | ⊕ | +1 | $1.673 \times 10^{-24}$ | 1.0076 | Ciclotrón |
| DEUTERON | $_1H^2$ | ⊕○ | +1 | $3.344 \times 10^{-24}$ | 2.0142 | Ciclotrón |
| NEUTRON | $_0n^1$ | ○ | 0 | $1.675 \times 10^{-24}$ | 1.0089 | Fuente Joliot Pila de Uranio |
| HELION | $_2H^4$ | ⊕⊕○○ | +2 | $6.645 \times 10^{-24}$ | 4.0028 | Radio α Ciclotrón |
| ELECTRON | $_{-1}e^0$ | — | −1 | $0.909 \times 10^{-27}$ | ~ 0 | Radio β Betatrón |

PROYECTILES ELECTROMAGNETICOS

| NOMBRE | LONGITUD DE ONDA | m e V | GENERADOR |
|---|---|---|---|
| Rayos X | $62 \times 10^{-6}$ Å | 200 | Betatrón |
| Rayos γ | 1.3 a 0.0047 Å | 0.1 a 1 | Natural (Radio) |
| Rayos Cósmicos | ? | ~ $10^6$ (orden) | Natural |

Fig. 26.

Como, en general, las fuentes de neutrones producen neutrones rápidos, es necesario *frenarlos* para disponer de proyectiles eficaces.

Esto se logra haciendo pasar los neutrones rápidos a través de ciertas substancias de bajo peso atómico (parafina, grafito, agua pesada, etc.).

Mecanismo del frenado de los Neutrones

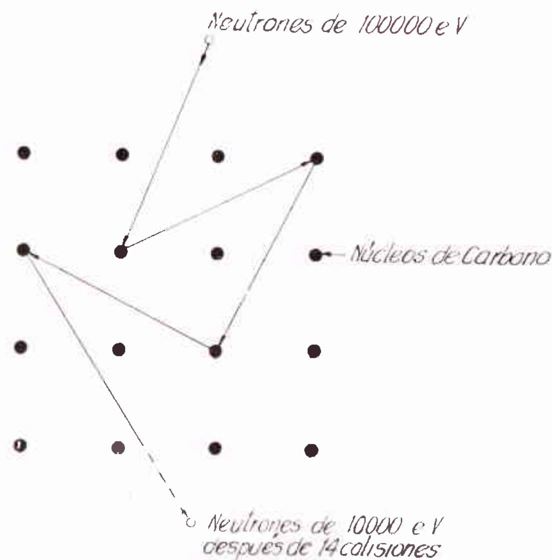



**Fig. 27.— Frenado** de neutrones por choques elásticos.

Los átomos de esas substancias tienen la siguiente propiedad: los choques de los neutrones con los núcleos de esos átomos ligeros, son elásticos y les transfieren parte de su energía cinética *sin ser capturados*, en la misma forma que se transfiere la velocidad de una bola de billar a otra.

Puede obtenerse así un flujo de neutrones lentos, de gran eficacia para golpear núcleos pesados. (1)

(1) La velocidad de los neutrones lentos es del orden de 1,000 m/seg.



Estos actúan, en cierto modo, como los blancos de los proyectiles de *proximidad*, usados en la última guerra.

Un neutrón lento, al pasar en la proximidad de un núcleo, es atraído por éste, siendo finalmente capturado.

Existen velocidades óptimas de captura.

Los neutrones a velocidades mayores tienen una mayor probabilidad de pasar de largo, sin sufrir la influencia del núcleo-blanco.

### Mecanismo de la transmutación del átomo. Reacciones nucleares

He presentado a los diminutos actores que actúan en el minúsculo escenario que es el núcleo atómico: los protones, los deuterones, los heliones, los electrones y los eficaces y poderosos neutrones.

Veamos ahora, con un poco más de detalle, cómo se produce una reacción nuclear, esto es, el fenómeno que ocurre cuando uno de los proyectiles descriptos acierta a un núcleo o se produce una captura.

Se dice que hay *transmutación* cuando a raíz de la colisión se proyectan en el espacio nuevas partículas, distintas de las que se enfrentaron antes del choque.

Por ejemplo: examinemos el caso del berilio golpeado por los rayos alfa. Se trata de una reacción nuclear entre núcleos de berilio y núcleos de helio o heliones, que cuando actúan como proyectiles, se designan con el nombre de rayos alfa. Cuando un helión se introduce dentro del núcleo de berilio, produce una transmutación de este núcleo, que se transforma en un núcleo de carbono con liberación de un neutrón.

Esta reacción es muy importante, porque es la que ocurre en la más conocida de las fuentes de neutrones. Basta poner en una pequeña ampollita de vidrio un poco de berilio pulverizado y llenar con radón, o sea, emanación de radio.

Esta emanación tiene la propiedad de desintegrarse espontáneamente, es decir, transmutarse sin necesidad de bombardeo con proyectiles externos, produciendo rayos alfa que actúan, a su vez, como proyectiles en la reacción del berilio.

Examinemos ahora la interesante cuestión de saber cómo se han intercambiado, en ese proceso, las partículas elementales constituyentes del núcleo, que, como sabemos, son los protones y los neutrones. El berilio atacado por los rayos alfa o heliones, tiene

un número de masa 9 y un número atómico 4. Quiere decir que el núcleo de berilio tiene en total 9 partículas componentes, 4 protones, y 9 menos 4, o sea 5 neutrones. El proyectil, que es un núcleo de helio, tiene número de masa 4 y número atómico 2.

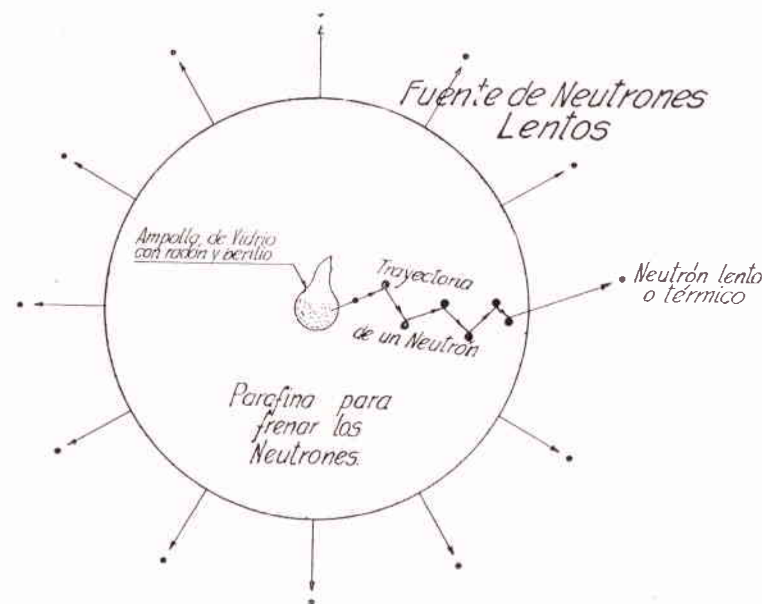



Fig. 28.— Fuente generadora de neutrones lentos (Joliot).

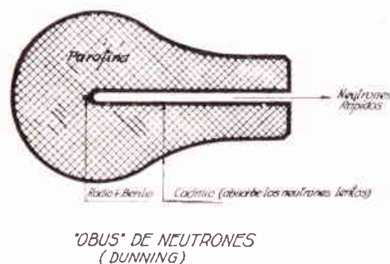



Fig. 29.— Fuente generadora de neutrones rápidos (Dunning).

Por tanto, tiene en total 4 partículas componentes, 2 protones y 2 neutrones. En resumen, antes del choque había presentes 6 protones y 7 neutrones.

Los fragmentos del choque fueron un núcleo de carbono y un neutrón. El núcleo de carbono tiene 12 partículas, 6 protones y 6 neutrones. Se tienen, por tanto, después del choque, 6 protones y 7 neutrones, lo mismo que antes del choque. Esta es una importante regla en la física nuclear. El número de protones y el número de neutrones es igual antes y después del choque. Es fácil así idear en el papel reacciones nucleares, prediciendo los resultados. Las partículas elementales no se destruyen en este proceso nuclear; se conservan (la llamada *emisión* β, constituye, sin embargo, una excepción; ver más adelante).



Sucede algo parecido en las reacciones químicas que, en el fondo, son *transmutaciones moleculares*. En las reacciones químicas, los ingredientes que se conservan invariables, son los átomos; en cambio, las moléculas se transforman o transmutan.

Volveremos más adelante sobre esta analogía.

Si designamos con la letra A al número de masa o sea al número de partículas fundamentales (protones y neutrones) contenidas en el núcleo y con las letras N al número de neutrones y P al número de protones (o sea la carga positiva del núcleo), se tiene:

$$A = N + P$$

que expresa con los símbolos de la aritmética lo dicho más arriba.

Para designar un determinado núcleo, sin lugar a dudas, basta dar un par cualquiera de esos tres números.

En física nuclear se utiliza como notación, el símbolo del núcleo, complementado con el número atómico, o sea el número de protones P y el número de masa o número de partículas A, en la forma que se indica a continuación:

$$_{P}S^{A}$$

donde la letra S representa el símbolo con que se designa al núcleo determinado.

Los números A y P son naturalmente enteros, ya que el número de partículas es entero.

Si se tiene dos núcleos isótopos, resulta de acuerdo a esta notación:

$$P = P'$$
$$A \neq A'.$$

La ubicación de cada uno de los 96 elementos y sus isótopos en la tabla periódica, está determinada por el número atómico P. A cada casillero le corresponde un número atómico.

un número de masa 9 y un número atómico 4. Quiere decir que el núcleo de berilio tiene en total 9 partículas componentes, 4 protones, y 9 menos 4, o sea 5 neutrones. El proyectil, que es un núcleo de helio, tiene número de masa 4 y número atómico 2.

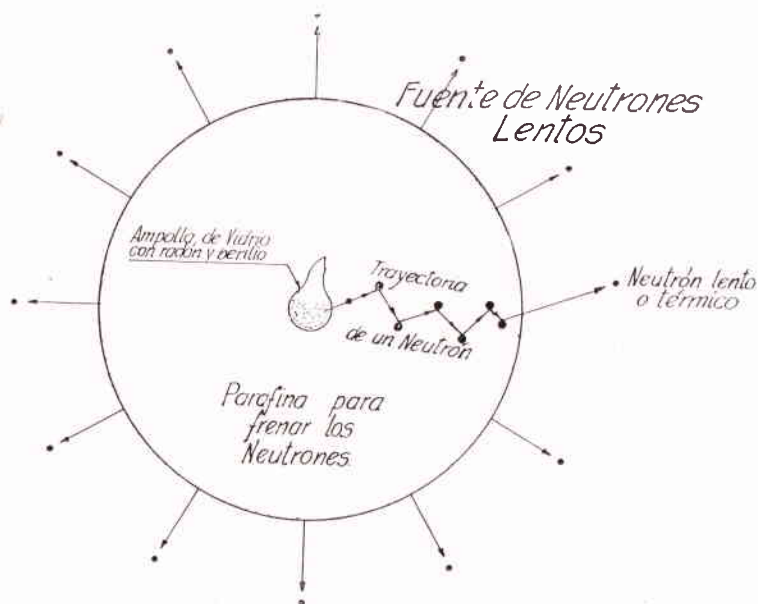



Fig. 28.— Fuente generadora de neutrones lentos (Joliot).

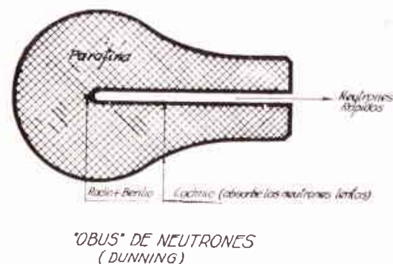



Fig. 29.— Fuente generadora de neutrones rápidos (Dunning).

Por tanto, tiene en total 4 partículas componentes, 2 protones y 2 neutrones. En resumen, antes del choque había presentes 6 protones y 7 neutrones.

Los fragmentos del choque fueron un núcleo de carbono y un neutrón. El núcleo de carbono tiene 12 partículas, 6 protones y 6 neutrones. Se tienen, por tanto, después del choque, 6 protones y 7 neutrones, lo mismo que antes del choque. Esta es una importante regla en la física nuclear. El número de protones y el número de neutrones es igual antes y después del choque. Es fácil así idear en el papel reacciones nucleares, prediciendo los resultados. Las partículas elementales no se destruyen en este proceso nuclear; se conservan (la llamada *emisión* β, constituye, sin embargo, una excepción; ver más adelante).



Sucede algo parecido en las reacciones químicas que, en el fondo, son *transmutaciones moleculares*. En las reacciones químicas, los ingredientes que se conservan invariables, son los átomos; en cambio, las moléculas se transforman o transmutan.

Volveremos más adelante sobre esta analogía.

Si designamos con la letra A al número de masa o sea al número de partículas fundamentales (protones y neutrones) contenidas en el núcleo y con las letras N al número de neutrones y P al número de protones (o sea la carga positiva del núcleo), se tiene:

$$A = N + P$$

que expresa con los símbolos de la aritmética lo dicho más arriba.

Para designar un determinado núcleo, sin lugar a dudas, basta dar un par cualquiera de esos tres números.

En física nuclear se utiliza como notación, el símbolo del núcleo, complementado con el número atómico, o sea el número de protones P y el número de masa o número de partículas A, en la forma que se indica a continuación:

$$_{P}S^{A}$$

donde la letra S representa el símbolo con que se designa al núcleo determinado.

Los números A y P son naturalmente enteros, ya que el número de partículas es entero.

Si se tiene dos núcleos isótopos, resulta de acuerdo a esta notación:

$$P = P'$$
$$A \neq A'.$$

La ubicación de cada uno de los 96 elementos y sus isótopos en la tabla periódica, está determinada por el número atómico P. A cada casillero le corresponde un número atómico.

Así, por ejemplo, para el núcleo de hidrógeno se tendrá:

$_1H^1$ = Protón (el isótopo del hidrógeno más abundante
$_1H^2$ = Deuterón en la naturaleza).
$_1H^3$ = Tritón.

Los tres isótopos están en la casilla 1 de la tabla periódica (ver pág. 58).

El estudio de las reacciones nucleares ha demostrado que esta notación puede y debe ser generalizada a los *neutrones* y a los *electrones*.

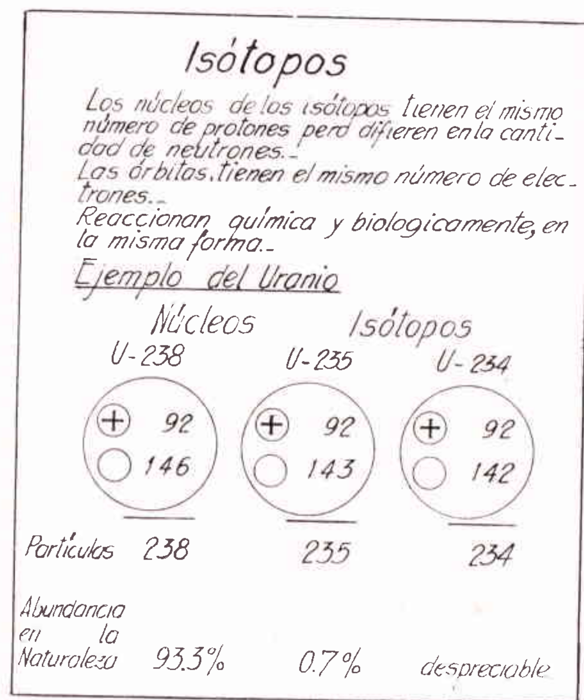



Fig. 30.

Esta generalización se basa en lo siguiente. El índice inferior representa, como dijimos, el número de protones existentes en la partícula o núcleo. Pero el número de protones representa, según vimos, el número de cargas eléctricas positivas del núcleo, que a su vez representa, en unidades electrónicas de carga, (1) la carga del núcleo.

(1) Una unidad electrónica de carga, es la carga de un electrón, equivalente a $1.6 \times 10^{-19}$ Coulomb.



de partículas —neutrones y protones— existentes en el núcleo.

Pero debido a la pequeñísima diferencia de masa entre neutrones y protones (ver cuadro citado), el índice superior representa aproximadamente en las unidades atómicas de masa —la masa del núcleo—. Las diferencias afectan sólo las cifras decimales, por tanto, los índices superiores expresan correctamente las unidades atómicas *enteras* de masa.

Basándonos en estas observaciones, la generalización de la notación para los neutrones y los electrones, resulta sencillamente como sigue:

Neutrón = $_0n^1$
Electrón = $_{-1}e^0$

puesto que el neutrón tiene carga nula y masa 1 y el electrón tiene carga —1 y masa nula prácticamente, todo expresado en unidades de carga electrónica y masa atómica.

Daré ahora algunas nociones sobre el mecanismo de las reacciones nucleares.

En toda reacción nuclear hay dos términos, como ocurre en las reacciones químicas: los *componentes* y el *producto resultante*. Estos dos términos se refieren a partículas componentes y resultantes. Así en el caso citado del berilio, los componentes eran los núcleos de berilio y de helio. El producto está formado por un núcleo de carbono y un neutrón.

Dentro de los componentes cabe distinguir la partícula *proyectil* (núcleo de helio, en nuestro caso) y la partícula blanco (núcleo de berilio).

En toda reacción nuclear hay que computar, además, un tercer término, me refiero a la *energía*, en idéntica forma a lo que ocurre en las reacciones químicas.

En general, la energía está presente en los componentes y en el producto, en forma de *energía cinética* de las partículas en juego y en forma de *masa* de esas partículas.

Esto último, de acuerdo con la famosa observación de Einstein, fundamental en la física nuclear, de que la masa es una forma de la energía, ligada a ésta por la sencilla ecuación:

$$E = mc^2.$$

En esta ecuación, E es la energía (Julios, por ej.); m es la masa (kilogramos, por ej.) y c es la velocidad de la luz en el vacío (metros/seg.).

Así, la energía cinética del proyectil debe computarse como energía suministrada por el medio exterior y la energía cinética de los productos, como energía liberada al medio exterior, donde reaparece en forma de calor. Si predomina la energía liberada sobre la suministrada, la reacción es exoenergética. En caso contrario, la reacción es endoenergética.

Las reacciones nucleares se rigen por dos principios fundamentales; el primero se refiere precisamente a la energía, y el segundo a las cargas. El primero de denomina *principio de la conservación de energía* y el segundo, *principio de la conservación de cargas eléctricas.*

*Principio de la conservación de energía.*— Se enuncia así: "La energía total [1] de los componentes es igual a la energía de los productos de la reacción".

Vemos, pues, que también en física nuclear vale el principio de la conservación de energía, computándose las variaciones de masa como variaciones de energía.

Podemos escribir entonces: Energía cinética + Energía de masa de los componentes = Energía cinética + Energía de masa de los productos.

Si la masa de las partículas no se altera durante la reacción, la energía cinética inicial sería igual a la energía cinética final. Pero esto no ocurre en general. Lo que ocurre es que la energía cinética inicial será mayor o menor que la final.

En el primer caso, la energía cinética del proyectil (supondré en lo sucesivo que el núcleo-blanco está en reposo) es mayor que la de los productos. Por tanto, éstos tendrán masa mayor que la de los componentes, de acuerdo con el principio enunciado de la conservación de energía. La reacción es endoenergética, o sea que consume energía. Me refiero a energía cinética, que es la que se computa como energía libre en las reacciones, pues es la que reacciona con el medio exterior.

En el segundo caso, la energía cinética del proyectil es menor que la de los productos. Por tanto, éstos tendrán una masa menor que la de los componentes. Habrá al final energía liberada, ya que la energía cinética de los productos se transferirá al medio circundante, por choque de las partículas con los átomos vecinos, aumentando su agitación (producción de calor).

(1) Energía de masa y energía cinética. La energía cinética se obtiene multiplicando la masa por la velocidad al cuadrado y dividiendo por dos.



micas, aunque los hechos no resultan tan explícitos debido a que en la química se opera con conjuntos de partículas y no individualmente, como se hace en física nuclear. [1]

En la conocida reacción química de la combustión, por ejemplo, tenemos también partículas proyectil y blanco, producto y energía liberada.

En efecto, se tiene en el simbolismo usual de la química:



$$O^2 + C = CO^2 + 4.1 \text{ eV}$$

donde $O^2$ es el proyectil formado por dos átomos de oxígeno que al golpear el átomo de carbono produce anhídrido carbónico $CO^2$ y libera un saldo neto de energía cinética (que es la energía utilizable) de 4.1 eV en forma de calor, por átomo de carbono.

El símbolo eV se refiere al *electrón-volt*, que es la unidad de energía utilizada en física nuclear. La he utilizado en este ejemplo de la química, para que nos sirva de comparación cuando estudiemos algunas reacciones nucleares. [2]

Para que se produzca la combustión se deben tener átomos de oxígeno suficientemente veloces para penetrar en la barrera de electrones periféricos del átomo de carbono (que son los primeros bastiones de la fortaleza atómica). Esto ocurre cuando la *temperatura* es suficientemente elevada, expresión estadística que equivale a decir, *agitación atómica suficiente para proveer proyectiles aptos.*

La liberación de energía también ocurre en este caso, debido a que la masa de $CO^2$ resultante es inferior a la suma de masas componentes. Pero este resultado está en contradicción con el principio fundamental que rige las combinaciones químicas, esto es, que las *masas se conservan en toda reacción.*

¿Debemos renunciar entonces a este principio que fué la base del desarrollo actual de la química?

Podemos contestar que no. Ocurre simplemente que la pérdida de masa que sufre el carbono y el oxígeno al aparearse

(1) En la novísima física nuclear de la pila y de la bomba atómicas, se opera también, por conjunto de partículas, como en la química.

(2) El eV se relaciona con las unidades de energía usuales, con las siguientes equivalencias:

1 Cal grande = $2.61 \times 10^{16}$ MeV (MeV = millones eV).
1 KW hora = $22.50 \times 10^{18}$ MeV
1 Julio = $6.25 \times 10^{12}$ MeV

posible de ser medida con la más perfecta balanza conocida (el espectógrafo de masa).

Para calcularla bastaría determinar por medio de la ecuación de Einstein, la masa que correspondería a la liberación de 4.1 eV por átomo de carbono. Se obtiene, para un kilogramo de carbono inicial, una pérdida de masa de 0.36 millonésima de gramo.

Por tanto, esta insignificante pérdida de masa no tiene influencia en las medidas de peso que hacen los químicos.

Vemos, además, que las reacciones de la química jamás hubieran permitido verificar la exactitud de la ecuación de Einstein.

No sucede lo mismo con las reacciones nucleares, como veremos. En estas reacciones la pérdida de masa está al alcance de las precisas balanzas utilizadas en física nuclear y es un término fundamental en el balance energético.

*Principio de la conservación de las cargas eléctricas.*— Se enuncia así: "La carga eléctrica de los componentes es igual a la del producto".

Este enunciado equivale a decir que la suma de los índices inferiores de los componentes, debe ser igual a la suma de los índices inferiores del producto.

## Algunos ejemplos

Veamos ahora cómo se aplica la notación explicada más arriba, para expresar las reacciones nucleares, poniendo de manifiesto el doble aspecto de la conservación de energía y carga.

Tomaremos el ejemplo citado del berilio bombardeado por heliones (fuente de neutrones de Joliot-Curie).

Los heliones no son otra cosa que núcleos de helio.

Los componentes serán, pues:

Berilio, o sea ${}_4Be^9$
Helio, o sea ${}_2He^4$.

El producto resultante es:

Carbono, o sea ${}_6C^{12}$ y
Neutrón, o sea ${}_0n^1$.



La reacción nuclear se expresa simplemente así:



$$ {}_2He^4 + {}_4Be^9 = {}_6C^{12} + {}_0n^1 + \varepsilon . $$

Esta igualdad debe entenderse como expresando la conservación de energía y de carga eléctrica.

En efecto, para los números inferiores, que expresan la carga eléctrica, se tiene:

$$ 2 + 4 = 6 + 0. $$

Para los números superiores, que son los enteros más próximos de los números que expresan las masas en juego, se tiene:

$$ 4 + 9 = 12 + 1. $$

Pero esta igualdad no expresa exactamente lo ocurrido con las masas, ya que estas *no se conservan*.

Esto se hubiera puesto en evidencia, si los números especificados expresaran realmente las masas, esto es, si hubiéramos mantenido los decimales correspondientes. (Así el litio tiene masa atómica 7 y su masa exacta es 7.01818 unidades atómicas de masa.)

Pero es más cómodo y significativo hacer como se indica, introduciendo un tercer sumando que representa la diferencia de masa que equivale a la energía liberada o consumida (energía cinética).

Si $\varepsilon$ es positivo, la energía es liberada y el producto pesa menos que los componentes.

Si $\varepsilon$ es negativo, la energía es consumida y el producto es más pesado que los componentes.

Esta ecuación permite calcular la energía en juego cuando se conocen las masas o viceversa.

Como en física nuclear se puede medir directamente masa y energía, resulta fácil verificar la exactitud de nuestras hipótesis.

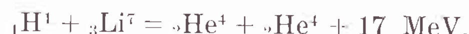
En el ejemplo estudiado hay liberación de energía.

Los neutrones del producto son proyectados a altísima velocidad, adquiriendo energía cinética a expensas de la reducción de masa del producto. Al cabo de un cierto tiempo, estos neutrones ceden su energía cinética al medio, por choque con los átomos vecinos, resultando en definitiva energía térmica.

Esto ocurre también en la combustión ordinaria. El calor producido por la combustión se debe a la transferencia al medio, de la energía cinética de las moléculas de $CO^2$ producido.

Examinemos otros casos típicos de reacciones nucleares. El núcleo de litio bombardeado por protones explota produciendo como fragmentos dos núcleos de helio, lanzados a enorme velocidad (reacción descubierta en 1932 por Cockcroft y Walton en Inglaterra, utilizando protones acelerados artificialmente).

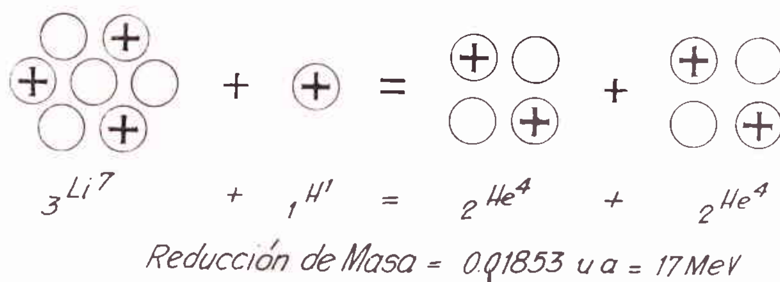
Resulta la ecuación:



$$_1H^1 + {}_3Li^7 = {}_2He^4 + {}_2He^4 + 17 \text{ MeV}.$$

Esta reacción es altamente exoenergética, pues libera 17 millones de eV por cada átomo de litio. Compárese esta cifra enorme con los 4.1 eV liberados por la combustión del carbono.

*Bombardeo del Litio por Protones*




*Reducción de Masa = 0.01853 u a = 17 MeV*

**Fig. 31.**— Esquema mostrando el intercambio de partículas que ocurre cuando se bombardea litio por protones.

La suma de los índices se conserva, según dijimos:

1 + 7 = 4 + 4 superiores
1 + 3 = 2 + 2 inferiores.

Calculemos ahora la energía liberada a partir de la reducción de masa del producto.

Se tiene en unidades atómicas de masa (u a):



Masa exacta del protón ...............

| | |
|---|---|
| Masa de los componentes .......... | 8.02631 u a |
| Masa exacta del producto resultante, dos núcleos de helio: 2 × 4.00389 | 8.00778 u a |
| Reducción de masa ................ | 0.01853 u a. |

De la ecuación de Einstein se deduce que una unidad atómica de masa es equivalente a 931 MeV.

Por tanto, la reducción de masa se traduce en la siguiente liberación de energía:

$$\varepsilon = 931 \times 0.01853 = 17 \text{ MeV}.$$

Esta es la cifra indicada más arriba, en el segundo miembro de la reacción simbólica.

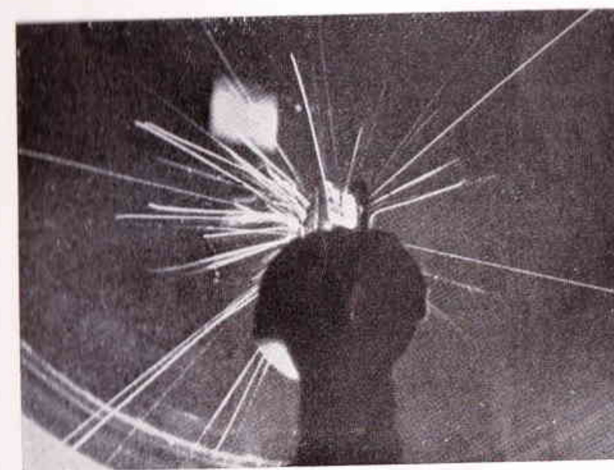


**Fig. 32.**— Bombardeo del litio por protones. Trazas de los fragmentos, núcleos de helio, observadas en la cámara de Wilson.

Es oportuno ahora plantear un problema. ¿Por qué no usar esta reacción para producir energía nuclear a la escala práctica?

Es fácil contestar esta pregunta.

La energía liberada por cada explosión atómica es enorme, pero el *rendimiento* de esta combustión "sui generis", es bajísimo.

En primer lugar, la probabilidad de acertar en el blanco, que tiene cada proyectil (protón), es muy pequeña. Es necesario enviar una nube de protones para lograr un impacto.

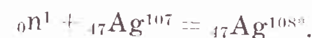
¿Qué valdría el carbón como combustible si hubiera que gastar una fortuna en fósforos para iniciar la combustión?

En segundo lugar, hay otra cuestión fundamental. La "combustión" del litio no se propaga como la del carbono y por tanto no se mantiene una vez cesado el proceso de ignición.

En el caso de la combustión ordinaria, la ignición de un cierto número de átomos produce suficiente agitación en los átomos vecinos como para que éstos se constituyan en nuevos proyectiles capaces de mantener el proceso. Se dice que éste es un proceso en *cadena* o de *contagio*.

Veamos ahora otro interesante ejemplo: captura de un neutrón proyectil, por un núcleo de plata.

La reacción que ocurre se expresa simbólicamente por esta ecuación:



$$_{0}n^{1} + {}_{47}Ag^{107} = {}_{47}Ag^{108*}.$$

Dejo de lado la cuestión de la energía, ya examinada en el ejemplo anterior, para encarar otros aspectos muy característicos de esta reacción.

El producto resultante es un isótopo pesado de la plata, debido a la incorporación del neutrón. El elemento resultante es *químicamente* igual al elemento componente, pues el número atómico, que es el que da la caracterización química y la ubicación en un determinado casillero del cuadro periódico, no ha variado. De ahí la designación "plata" para ambos.

El asterisco junto al índice superior expresa convencionalmente que el núcleo de plata resultante es inestable. Es decir, que se desintegra espontáneamente (sin la acción de proyectiles atómicos), dando lugar a otros núcleos o partículas.

El proceso de esta desintegración es lo que se llama *radioactividad*.

Este es un caso de *radioactividad provocada o artificial* (descubierta por la pareja Joliot-Curie, 1933).

La intensidad de desintegración se mide por la *vida media* de los núcleos, que no es otra cosa que el tiempo necesario para que una cierta masa de núcleos inestables se reduzca a la mitad por desintegración.

En nuestro ejemplo, la vida media de la plata radioactiva $_{47}Ag^{108*}$ es de 2.3 minutos.

Analicemos ahora el proceso de desintegración de la plata radioactiva generada en la reacción previa. Lo que ocurre se expresa simbólicamente así:



$$_{47}Ag^{108*} = {}_{48}Cd^{108} + {}_{-1}e^{0}.$$



La desintegración da lugar a un núcleo *estable* de cadmio y a un electrón, al que designamos con la notación indicada, atribuyéndole una masa nula y una carga eléctrica —1.

Se cierra así, en dos etapas, el proceso iniciado artificialmente.

La emisión de electrones se detecta experimentalmente en forma de radiación o rayos que se designan habitualmente con el nombre de rayos beta. Al proceso se le designa con el nombre de desintegración beta (β).

Este resultado es muy importante. Seguramente más de un lector cuidadoso se preguntará de dónde sale este electrón, ya que en el núcleo hay sólo neutrones y protones.

Estamos frente a una de las cuestiones más enigmáticas y aún no bien resuelta de la física nuclear.

Una cosa firmemente aceptada es que en el núcleo no hay electrones. Se llega a esta conclusión por un notable razonamiento basado en el famoso *principio de la indeterminación* de Heisenberg.

¿Cómo se interpreta entonces la emisión de electrones o emisión beta, de nuestro ejemplo o de otros similares?

En una forma aparentemente muy simple. Se supone que un núcleo emite un electrón, cuando alguno de sus neutrones, en condiciones especiales, se descompone en un protón y en un electrón. (1) El primero permanece en el núcleo y el segundo es emitido.

Esta transformación o descomposición, satisface nuestro esquema de reacción nuclear.

En efecto, se podría poner:



$$_{0}n^{1} = {}_{1}H^{1} + {}_{-1}e^{0} + \varepsilon.$$

Vemos que se cumple para los índices:

$$1 = 1 + 0$$
$$0 = 1 - 1.$$

Sin embargo, surge una dificultad inesperada que empaña tan clara explicación. Midiendo la energía cinética del electrón emitido, se comprueba que es inferior a la que resultaría de la reducción de masa registrada en el proceso de descomposición del neutrón.

(1) El neutrón sería radioactivo, con emisión β y vida media de 30 minutos. Hasta el presente no hay pruebas experimentales de esta radioactividad.

... los físicos admiten, basados en importantes evidencias teóricas y experimentales, que además de la emisión del electrón, hay la emisión de una misteriosa partícula no detectada aún con seguridad.

Esta partícula, llamada *neutrino*, estaría dotada exactamente de la energía cinética necesaria para balancear nuestra ecuación de energías.

El neutrino tendría nulas la carga eléctrica y la masa en reposo, expresándose convencionalmente por el símbolo ${}_0n^0$.

La ecuación corregida con la introducción del neutrino, sería:

$${}_0n^1 = {}_1H^1 + {}_{-1}e^0 + {}_0n^0 + \varepsilon.$$

Actualmente se tiende a aceptar que los protones y neutrones que constituyen un núcleo, representan en el fondo estados energéticos característicos, susceptibles de intercambiarse con emisión de electrones o *positones*.

Estas son partículas de igual masa que los electrones, pero de carga eléctrica positiva, aunque de igual valor absoluto. Se diferencian además de los electrones por su vida efímera (descubiertos en 1932 por Anderson).

Es oportuno señalar que cuando un núcleo emite un electrón, pierde una carga eléctrica negativa, es decir, aumenta en una unidad electrónica su carga eléctrica positiva.

Por tanto, aumenta en una unidad su número atómico, avanzando un puesto en el casillero del cuadro periódico de los elementos.

Otro ejemplo notable de desintegración es el del radio. En este caso, la radioactividad es *natural*.

El elemento radio es naturalmente inestable y se desintegra produciendo varias partículas y radiaciones con una vida media muy grande (1590 años).

Un gramo de radio se reduce a medio gramo en 1590 años.

Puede decirse que el descubrimiento del radio, realizado a principios de este siglo, por los esposos Curie, puso a los hombres de ciencia frente a uno de los raros resquicios brindados por la naturaleza, a través del cual pudo atisbarse, por primera vez, el misterio de la estructura nuclear.

Finalmente diré algunas palabras sobre la reacción llamada *fisión del uranio*, base de la primera bomba atómica.



se produce esta reacción ... tos (1) a un isótopo escaso del uranio, el ${}_{92}U^{235}$.

Daré uno de los esquemas propuestos para esta reacción, que se desarrolla en varias etapas sucesivas. La primera etapa sería:



$${}_0n^1 + {}_{92}U^{235} = {}_{92}U^{236*} + \gamma.$$

La captura del neutrón por el uranio, produce un isótopo radioactivo del mismo, es decir, inestable, acompañado de una emisión γ. Esta es una radiación parecida a la de los rayos X, pero más penetrante (el radio es la fuente más conocida de esta radiación, de uso corriente en la medicina).

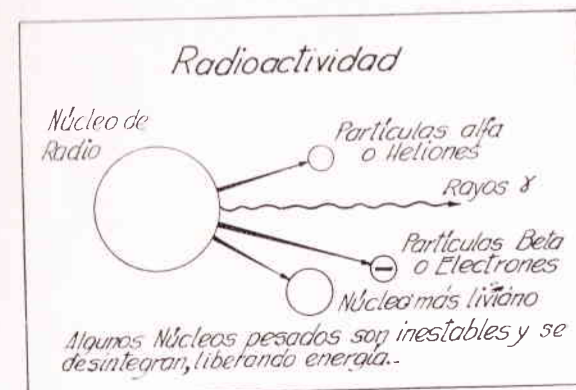



Fig. 33.

En la segunda etapa, el núcleo radioactivo de uranio se desintegra a su vez (explota), proyectando dos fragmentos iguales (fisión), constituídos por dos núcleos de paladio, también altamente inestables o radioactivos.



$${}_{92}U^{236*} = {}_{46}Pd^{118*} + {}_{46}Pd^{118*}.$$

Finalmente, estos núcleos de paladio se desintegran (tercera etapa), formando núcleos estables por pérdida de neutrones dotados de enorme energía cinética.

---

(1) Llamados también **neutrones térmicos** porque su energía es equivalente a la de las moléculas en agitación térmica.

... general, que el exceso de neutrones en un núcleo es signo seguro de inestabilidad del mismo.

La importancia de la fisión del uranio, descubierta por Hahn en 1939, está en la enorme energía que libera, avaluada aproximadamente en 200 MeV y en la circunstancia que he señalado, de la emisión de nuevos neutrones.

En efecto, estos neutrones son capaces, a su vez, de provocar nuevas fisiones, haciendo que el proceso se propague en cadena, como la combustión ordinaria. Ambos procesos son formalmente análogos. Pero la energía liberada por el nuevo "combustible" es *millones* de veces superior a la liberada por una masa igual de carbón o cualquier otro combustible conocido.

Estamos frente a un descubrimiento extraordinario que penetró violentamente en la historia de la humanidad, en Hiroshima y Nagasaki.

Sus repercusiones futuras son difíciles de predecir, pero serán grandes, sin duda alguna, pues con él se ha iniciado la era de la energía nuclear, multiplicándose las posibilidades del hombre hasta un límite inverosímil. Esperemos, en cambio, que no se multipliquen sus tribulaciones.

El Prof. Cacciapuoti, volverá con mucho más detalle sobre este proceso, asociándolo a sus proyecciones prácticas y en especial a la pila y a la bomba atómicas.



# LA FISION DEL URANIO

## Cómo se ha llegado a utilizar la fisión nuclear como fuente de gran energía

### La reacción en cadena. La pila de uranio. Los explosivos atómicos

Prof. Dr. NESTORE BERNARDO CACCIAPUOTI *

El ingeniero Walter Hill ha ilustrado en una exposición sumamente clara cuáles son los principios esenciales en que se basa la moderna física nuclear. Les habló de las diversas partículas elementales que intervienen en la composición del núcleo atómico y en el proceso de desintegración de los átomos, que se obtiene con los medios modernos en uso en los laboratorios de física.

Partiendo de estas nociones, me permito hoy solicitar la atención del auditorio sobre un capítulo particular de la física nuclear, y más precisamente sobre el conjunto de hechos que se refieren al fenómeno de la fisión del uranio.

El descubrimiento de este fenómeno ha demostrado ser tan rico en consecuencias como para constituir una rama de la ciencia cuyos aspectos interesan no sólo a la física, sino también a la química, la biología, la medicina, la ingeniería y, podría decir, hasta a la política.

Antes de hablar del fenómeno de la fisión del uranio, permitidme hacer una breve reseña histórica de los hechos experimentales que han conducido a este descubrimiento fundamental.

Examinemos un momento la tabla que representa el sistema periódico de los elementos (fig. 34). Como es sabido, y como podéis ver en la figura, los elementos que se encuentran en la naturaleza tienen un número atómico comprendido entre uno y noventa

* Director del Instituto de Física de la Universidad de Trieste, oficial de cooperación científica de la UNESCO.

# TABLA PERIODICA DE LOS ELEMENTOS

| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | | | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | 1 H Hidrógeno 1-2 | | | | | | | | | | 2 He Helio 3-4 |
| II | 3 Li Litio 6-7 | 4 Be Berilio 9 | 5 B Boro 10 11 | 6 C Carbono 12 13 | 7 N Nitrógeno 14 15 | 8 O Oxígeno 16 17 18 | 9 F Fluor 19 | | | | 10 Ne Neón 20 21 22 |
| III | 11 Na Sodio 23 | 12 Mg Magnesio 24 25 26 | 13 Al Aluminio 27 | 14 Si Silicio 28 29 30 | 15 P Fósforo 31 | 16 S Azufre 32 33 34 36 | 17 Cl Cloro 35 37 | | | | 18 Ar Argón 36 38 40 |
| IV | 19 K Potasio 39 40 41 | 20 Ca Calcio 40 42 43 44 46 48 | 21 Sc Escandio 45 | 22 Ti Titanio 46 47 48 49 50 | 23 V Vanadio 51 | 24 Cr Cromo 50 52 53 54 | 25 Mn Manganeso 55 | 26 Fe Hierro 54 56 57 58 | 27 Co Cobalto (57) 59 | 28 Ni Niquel 58 60 61 62 64 | |
| | 29 Cu Cobre 63 65 | 30 Zn Zinc 64 66 67 68 70 | 31 Ga Galio 69 71 | 32 Ge Germanio 70 72 73 74 76 | 33 As Arsénico 75 | 34 Se Selenio 74 76 77 78 80 82 | 35 Br Bromo 79 81 | | | | 36 Kr Kriptón 79 80 82 83 84 86 |
| V | 37 Rb Rubidio 85 87 | 38 Sr Estroncio 84 86 87 88 | 39 Y Ytrium 89 | 40 Zr Zirconio 90 91 92 94 96 | 41 Nb Niobium 93 | 42 Mo Molibdeno 92 94 95 96 97 98 100 | 43 Ma Masurium 96 99 101 | 44 Ru Rutenio 96 98 99 100 101 102 104 | 45 Rh Rodio 103 | 46 Pd Paladio 102 104 105 106 108 110 | |
| | 47 Ag Plata 107 109 | 48 Cd Cadmio 106 108 110 111 112 113 114 116 | 49 In Indio 113 115 | 50 Sn Estaño 112 114 115 116 117 118 119 120 122 124 | 51 Sb Antimonio 121 123 | 52 Te Teluro (120) 122 123 124 125 126 128 130 | 53 I Iodo 127 | | | | 54 Xe Xenón 124 126 128 129 130 131 132 134 136 |
| VI | 55 Cs Cesio 133 | 56 Ba Bario 130 132 134 135 136 137 138 | TIERRAS RARAS 57 a 71 | 72 Hf Hafnio 174 176 177 178 179 180 | 73 Ta Tantalo 181 | 74 W Tungsteno 180 182 183 184 186 | 75 Re Renio 185 187 | 76 Os Osmio 184 186 187 188 189 190 192 | 77 Ir Iridio 191 193 | 78 Pt Platino 192 194 195 196 198 | |
| | 79 Au Oro 197 | 80 Hg Mercurio 196 198 199 200 201 202 204 | 81 Tl Talio 203 205 | 82 Pb Plomo 204 206 207 208 | 8 Bi Bismuto 209 | 84 Po Polonio 210 | 85 Eka Iodo 211 216 218 | | | | 86 Rn Rodón 222 |
| VII | 87 Eka Cesio 223 | 88 Ra Radio 226 | 89 Ac Actinio 227 | 90 Th Torio 232 | 91 Pa Protoactinio 231 | 92 U Uranio 234 235 238 | 93 Np Neptunium 238 239 | 94 Pu Plutonio 238 239 | 95 Am Americium 241 | 96 Cm Curium 241 242 | |

| TIERRAS RARAS | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 57 La Lantano 139 | 58 Ce Cerio 136 138 140 142 | 59 Pr Prasoedimio 141 | 60 Nd Neodimio 142 143 144 145 146 148 150 | 61 IL Illinium 144 | 62 Sm Samarium 144 147 148 149 150 152 154 | 63 Eu Europium 151 153 | 64 Gd Gadolinium 152 154 155 156 157 158 160 |
| | 65 Tb Terbium 159 | 66 Dy Dysprosium 158 160 161 162 163 164 | 67 Ho Holmium 165 | 68 Er Erbium 162 164 166 167 168 170 | 69 Tm Thulium 169 | 70 Yb Ytterbium 168 170 171 172 173 174 176 | 71 Lu Lutecium 175 176 | |

LOS NUMEROS rayados inferiormente son los números de masa de los ISOTOPOS RADIOACTIVOS.-

Fig. 34.— Clasificación periódica de los elementos.



y dos. En 1934 y 1935, Enrique ... de las transmutaciones producidas artificialmente en los diversos elementos del sistema periódico, por efecto del bombardeo con neutrones.

En particular, al bombardear el último elemento del sistema periódico, es decir, el uranio, notó que se obtenía una nueva radioactividad debida a la emisión de partículas beta, o sea electrones.

Como lo explicó el ingeniero Hill, la emisión de un electrón por parte de un núcleo corresponde a un aumento de una unidad en el número atómico del núcleo mismo. Como el uranio tiene el número atómico 92, la emisión de un electrón por parte de un núcleo de uranio da, pues, origen a un nuevo elemento de número atómico 93.

Así, del análisis químico de los productos de la desintegración del uranio por efecto de los neutrones lentos, Fermi llegó a la conclusión que entre éstos se debían encontrar elementos de número atómico 93, 94, 95 y 96; a éstos dió el nombre de *elementos transuránicos.*

Experimentos de este tipo fueron repetidos en otros laboratorios, en particular por Hahn, Meitner, Strassman, Irene Curie-Joliot y Savitch. Se siguió teniendo presente, sin embargo, que se las habían con elementos transuránicos, es decir, con elementos nuevos, de número atómico superior al del uranio, a pesar de que aquellos no tenían las propiedades químicas que corresponden a su posición en el sistema periódico.

## La fisión del uranio

El 6 de enero de 1939, Hahn y Strassman, después de un largo y meticuloso estudio, procedieron a formular el juicio siguiente: "Con vacilaciones, dada la extrañeza de los resultados, llegamos a la conclusión que los isótopos radioactivos producidos por la desintegración del uranio tienen las propiedades del bario, del lantanio y cerio. . .".

Este resultado permitió contemplar la hipótesis de que, por efecto del choque con un neutrón, el núcleo del uranio no sufriese sólo una ligera modificación, como la observada hasta entonces en los otros núcleos, sino que se dividía en dos partes de tamaño aproximadamente igual: a este nuevo proceso se le dió el nombre de *"fisión"*.

fragmentos. En el mismo tiempo son emitidos dos neutrones que chocan a su vez contra otros dos núcleos de U-235, que también se dividen. De tal manera se liberan cuatro nuevos neutrones que dan lugar sucesivamente a otras divisiones y así en adelante.

Se comprende, pues, fácilmente, por qué la atención de los físicos se concentrara rápidamente sobre este punto que repre-

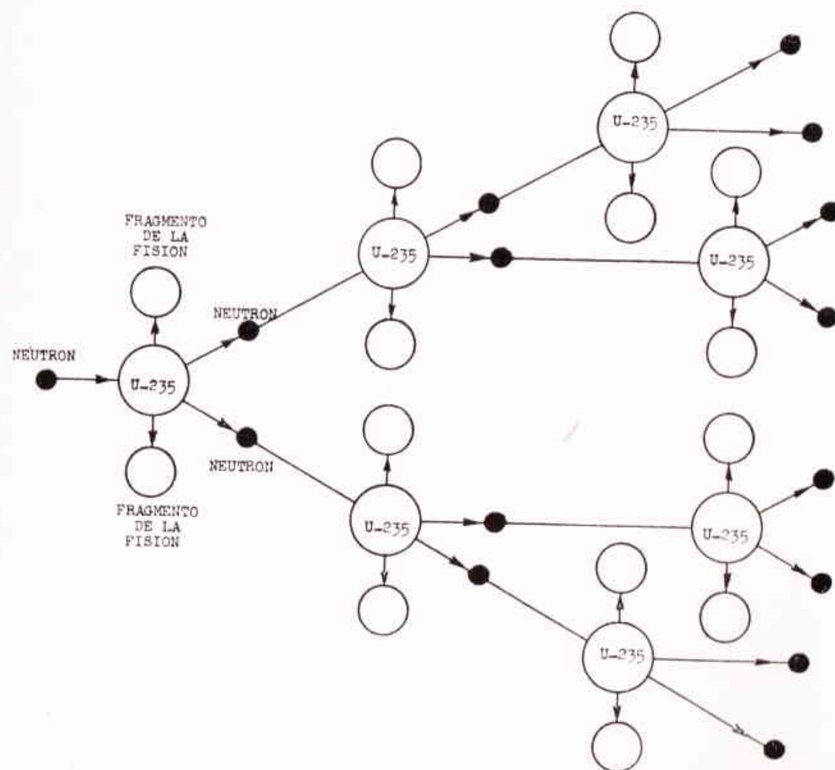



Fig. 36.

sentaba la clave para resolver el problema del aprovechamiento de la energía atómica. Se había visto que el uranio natural estaba constituído por una mezcla de tres isótopos, de peso 234, 235 y 238; como les explicó el ingeniero Hill, en su conferencia, los isótopos de un mismo elemento tienen idénticas propiedades químicas y se diferencian solamente por la diversidad de su masa. Ahora en varios laboratorios se había observado que únicamente el isótopo 235 del uranio, que en el uranio natural se



encuentra en la proporción de 0,7 %, sufría el proceso de fisión por efecto de los neutrones lentos, es decir, de los neutrones que tienen una energía bajísima.

Por otra parte, también se había observado que efectivamente en la fisión del uranio 235 (U-235), llegaban a liberarse neutrones. Pensándolo bien, este hecho no debe sorprender si se considera la figura 37. El isótopo U-235 está constituído por 92 protones y 143 neutrones. Por captura de un neutrón el núcleo

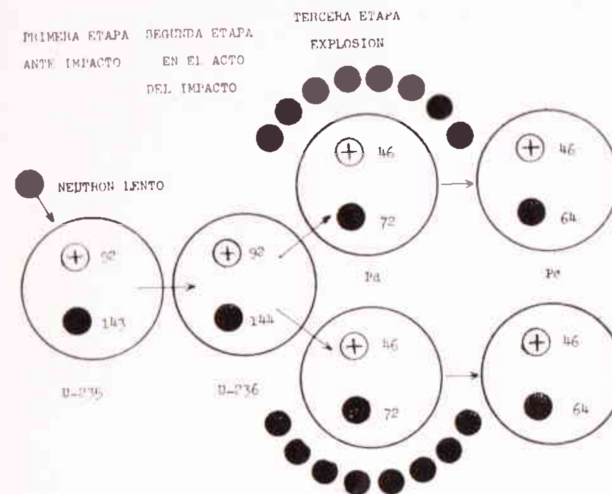



Fig. 37.

U-235 se convierte en un núcleo de masa 236. Si éste se partiese en dos fragmentos iguales, éstos tendrían cada uno 46 protones, y serían isótopos del paladio con una masa de 118.

Ahora, el más pesado de los isótopos naturales del paladio, tiene una masa 110; esto significa que cada uno de los fragmentos de la fisión tiene ocho neutrones de más y por tanto es inestable. Por esta razón, tenderán de alguna manera a recobrar la estabilidad, ya sea emitiendo neutrones, ya sea desintegrándose con desprendimiento de partículas beta. Nótese que el ejemplo citado es sólo un caso ideal, porque en realidad el núcleo de U-235 no se divide en dos partes iguales. Sea como sea, las experiencias han demostrado que en la fisión se desprenden neutrones en número de dos o tres por átomo.

Era, pues, virtualmente posible realizar una reacción en cadena por medio de la fisión. Desde el punto de vista práctico

…, sin embargo, una grave dificultad debida al hecho que el uranio natural está constituido en su mayor parte por átomos de U-238. Ahora, los núcleos de U-238 gozan de la propiedad de capturar fácilmente los neutrones de una determinada energía.

Examinemos la figura 38, en la cual están representadas en escala arbitraria las diferentes energías en juego.

Los neutrones emitidos durante la fisión tienen una energía media representada por el nivel más alto de la figura. Al atravesar la masa de uranio, van siendo frenados y su energía dis-

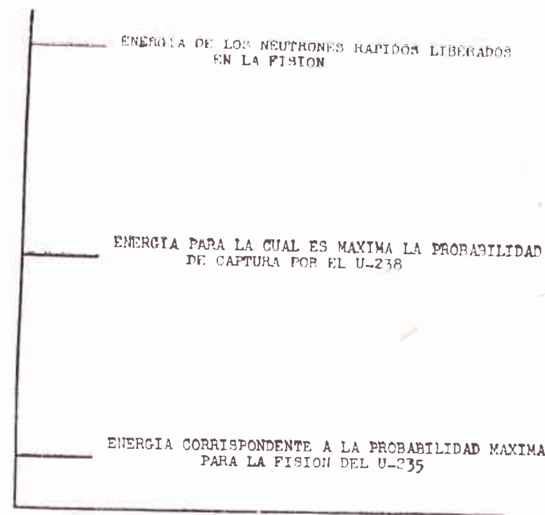



Fig. 38.

minuye gradualmente. Para producir la fisión en otros átomos de U-235, la energía de los neutrones debe descender hasta el valor indicado por el nivel inferior de la figura (energía térmica). Como se ve, por el dibujo, en este proceso de pérdida de velocidad de los neutrones, desde la energía máxima en el acto de la fisión hasta la energía mínima necesaria para reproducir la fisión del U-235, los neutrones deben atravesar una zona donde su energía es tal que pueden ser capturados por el U-238.

La situación es, pues, la representada en la figura 39; un neutrón térmico (neutrón dotado de una energía cinética de valor aproximado a lo de la agitación térmica molecular) choca contra un átomo de U-235, que se parte en dos fragmentos liberando simultáneamente neutrones rápidos. Estos neutrones van per-



logran producir la fisión de los otros átomos de U-235, porque son capturados por los átomos de U-238, es decir, eliminados.

Para establecer una analogía que podrá parecer por cierto muy poco científica, examinemos la figura 40. Imaginemos que desde el punto A, en la parte superior de la figura, salga un neutrón veloz, generado en la fisión de un núcleo, moviéndose en la dirección A-B. Al atravesar la materia, esta lo irá frenando y perderá energía a medida que avance.

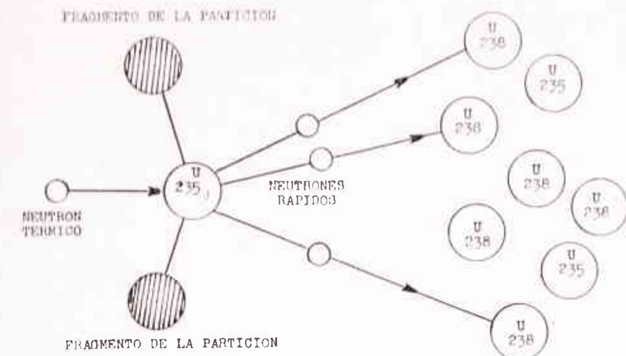



Fig. 39.

## La pila de uranio

Ahora, si toda la masa de materia está constituida por uranio natural, el neutrón, al llegar a un cierto punto, entrará en una zona donde su energía será tal que el U-238 lo capturará, y por tanto, lo eliminará. La situación, pues, es similar a la ilustrada en la parte de abajo de la figura. Un ratón (el neutrón) debe ir desde el punto A hasta el punto B, pasando a través de una zona en la cual se encuentra un gato en acecho (U-238). Mientras el ratón está a la izquierda de la zona vigilada por el gato, estará a salvo y no podrá ser capturado. Si logra pasar a la derecha de la zona vigilada por el gato, estará a salvo de nuevo. Pero es en la zona intermedia donde corre el riesgo de ser atrapado. Este ejemplo sugiere también el remedio: está claro que para que el ratón pueda pasar de A a B, basta con sacar el gato de la zona intermedia. Bien, pues, ese es precisamente el método adoptado por Fermi y Szillard al construir la llamada *"pila de uranio"*. Se trata de un montón de ladrillos de uranio intercalados con ladrillos de grafito. El grafito es un

Volviendo a la figura 40, vemos que si en la parte de arriba se substituyese el bloque de uranio, de la zona intermedia, por un bloque de grafito, el neutrón que parte de A atravesará *la zona crítica* pasando por el grafito sin que lo capture. Sale, pues, del grafito y entra de nuevo en el bloque de uranio de la derecha de la figura; pero ahora su energía es tan baja que el neutrón no es más capturado por los átomos de U-238 y puede producir la fisión de otro átomo de U-235 puesto en B.

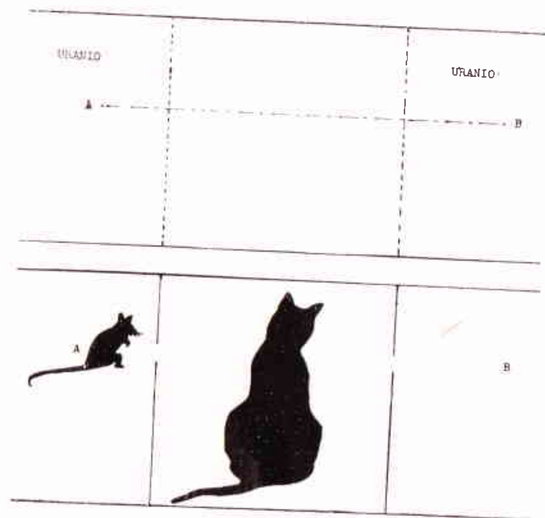


Fig. 40.

Esto es, por tanto, el principio sobre el cual se basa la construcción de una pila de uranio. Por razones de orden práctico no se usan ladrillos de uranio y grafito, sino que se construye un montón de grafito que tiene huecos cilíndricos en los cuales se ponen barras de uranio (fig. 41). Esto permite colocar y sacar fácilmente el uranio de la pila, para hacer las separaciones químicas de que hablaremos en seguida.

Antes de proseguir, conviene señalar que la pila de uranio debe tener dimensiones bastante importantes para que mantenga en ella una reacción en cadena con producción de energía. Esto se debe al hecho que los neutrones están dotados de un gran poder de penetración de la materia y en consecuencia, si la pila es demasiado pequeña, los neutrones tienen una alta probabilidad



U-235: no se obtiene en este caso una pila de mantenimiento autónomo. Si, viceversa, la pila es tan grande que, en promedio, los neutrones tienen poquísimas probabilidades de escapar, entonces la pila se mantiene, desarrollándose de un modo continuo la energía, bajo varias formas, entre las cuales la más importante, desde el punto de vista de la utilización industrial, es la energía térmica.

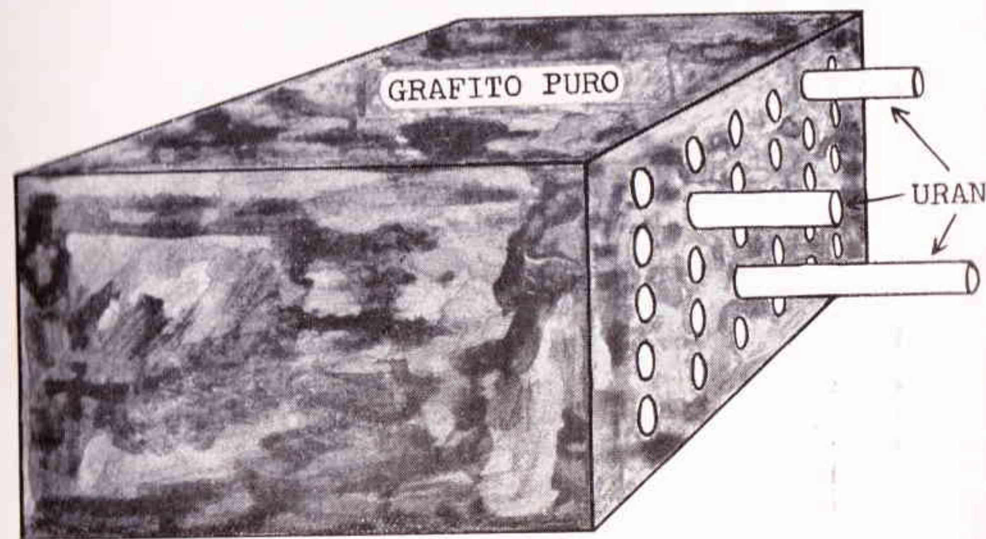


Fig. 41.

Se deduce fácilmente que no se puede utilizar una fuente de energía, de este tipo, de dimensiones muy reducidas: una pila de uranio puede ser construída únicamente en gran escala, tanto más cuanto que hay que tener en cuenta todos los servicios auxiliares, como ser: planta de enfriamiento, sistema de protección contra las radiaciones, dispositivos para regular la temperatura, y la potencia de régimen, sistemas de control, servicios químicos, etcétera.

La potencia de régimen de una pila de uranio, se puede variar por medio de barras de *cadmio* o de acero *al boro, dispuestas* en la pila de manera que se puedan fácilmente maniobrar desde el exterior. El cadmio y el boro tienen, en efecto, la propiedad de absorber considerablemente los neutrones térmicos: si, pues,

la pila, una parte de los neutrones térmicos es absorbida y la reacción se propaga más lentamente con disminución de la potencia desarrollada.

Para obtener fuentes de energía nuclear de dimensiones más reducidas, es necesario recurrir a las llamadas "pilas enriquecidas". En éstas, en lugar de uranio natural, se pone uranio en el cual se ha aumentado artificialmente el contenido de U-235, es decir, uranio enriquecido con U-235. Los procedimientos para aumentar la concentración de U-235 son muy laboriosos y re-

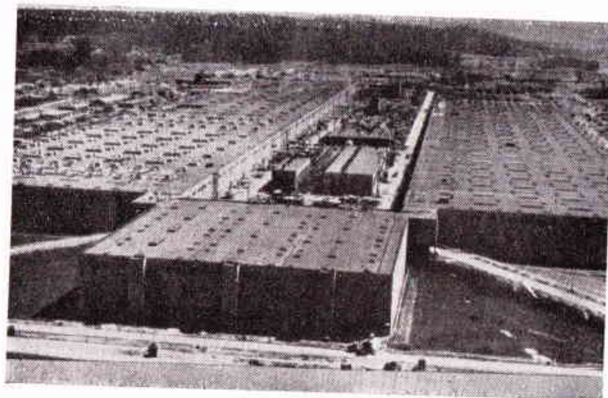


Fig. 42.

quieren plantas muy costosas, si se pretende obtener una verdadera producción industrial. En la figura 42 vemos, por ejemplo, una de las plantas de Oak Ridge, en Estados Unidos, donde se separa el U-235 con métodos electromagnéticos. La figura 43 muestra, a su vez, las plantas de Oak Ridge para la concentración de U-235 con el método de difusión gaseosa. Como se ve se trata de instalaciones imponentes.

Paso de largo los numerosos problemas técnicos que se presentan en la construcción de una planta de energía atómica, así como los puntos complejos que se refieren a la purificación del uranio y el grafito necesarios para construir una pila.

En algunas plantas se ha usado el agua pesada en vez del grafito. Como es sabido, el agua pesada se diferencia del agua común por el hecho de que sus moléculas son constituídas por oxígeno e *hidrógeno pesado o "deuterio"*.



El elemento hidrógeno tiene dos isótopos naturales:

1) El hidrógeno *liviano*, cuyo núcleo es constituído por un solo protón.
2) El hidrógeno *pesado*, cuyo núcleo es constituido por un protón y un neutrón.

El núcleo del hidrógeno pesado es una partícula de una importancia fundamental en la moderna física nuclear: a esta partícula se le ha puesto el nombre de "*deuton*".

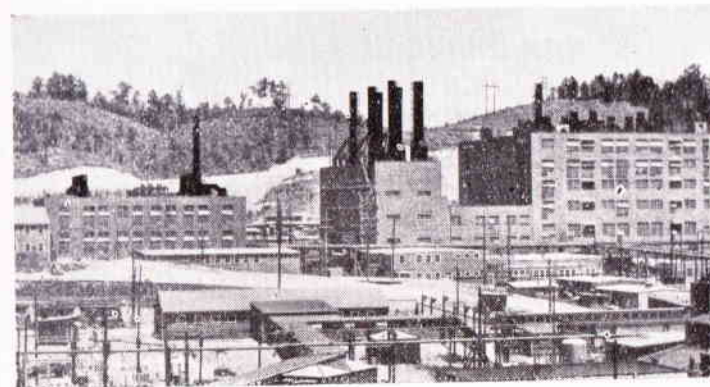


Fig. 43.

El agua pesada es muy eficaz para frenar los neutrones hasta reducirlos a energías bajísimas (energía térmica), y tiene, comparada con el agua común, la ventaja de no capturar los neutrones.

En la construcción de la pila de uranio, además, el uso del agua pesada es más ventajoso que el del grafito. En efecto, el agua pesada permite obtener una potencia mayor a paridad de volumen de la pila.

Se comprende, pues, por qué en muchos laboratorios la atención de los físicos y químicos se concentra en seguida sobre el problema de la producción en grandes cantidades de agua pesada. Varias plantas importantes han sido construídas para la producción de agua pesada en cantidad considerable. Alrededor de una de estas plantas se han desarrollado verdaderas batallas, como por ejemplo en Noruega, donde los aliados lograron destruir las centrales alemanas de agua pesada.

Tenemos que hablar ahora de uno de los productos generados durante el funcionamiento de una pila de uranio, producto que tiene una importancia fundamental para la realización de los explosivos atómicos: *el "plutonio"*. Al hablar de la reacción nuclear en cadena basada en la fisión, se dijo que el U-238 tenía la propiedad de capturar los neutrones de cierta energía. Pero sucede siempre, por más que se recurra al artificio de alternar bloques de uranio y bloques de grafito o de agua pesada, con el fin de reducir este efecto en las pilas de uranio, que un gran número de neutrones son capturados de cualquier manera por

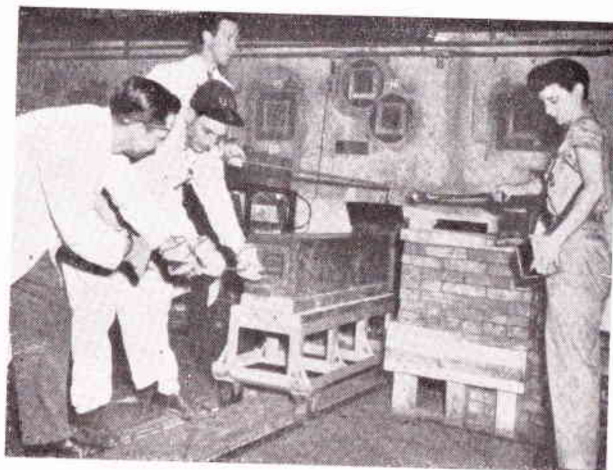


**Fig. 44.** — Extracción de material radioactivo de una pila de uranio.

los átomos de U-238. Se ha observado que el U-238, al capturar un neutrón, se transforma por desintegración radioactiva en un nuevo elemento químico de número atómico 93, al cual se ha dado el nombre de *neptunio*.

El neptunio es un elemento radioactivo que se desintegra, dando origen a otro elemento químico nuevo, de número atómico 94, al cual se ha dado el nombre de *"plutonio"*, y que se indica con el símbolo *Pu*.

El hecho fundamental es que el isótopo 239 del plutonio que se produce de este modo, da lugar, igual que el U-235, al fenómeno de la fisión por efecto de los neutrones lentos.

Es claro que el problema de la extracción del plutonio, de una pila de uranio, es mucho más sencillo que separar U-235 de



U-238. En efecto, se trata de un elemento de número atómico 94, con propiedades químicas diferentes del uranio, y por tanto puede ser extraído por procesos químicos ordinarios. Se comprende entonces la importancia del descubrimiento del plutonio para la realización de la bomba atómica. En la figura 44, se ve justamente una parte de una pila de uranio, de la cual se extrae un bloque que contiene plutonio. Periódicamente se efectúa esta extracción en cada bloque de uranio de la pila, y se recoge el Pu-239 que se forma a expensas del U-238.

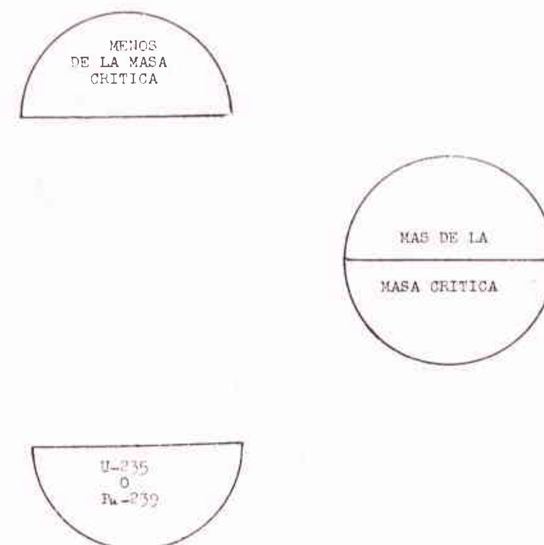



**Fig. 45.**

Todas las operaciones de manejo de la pila, así como las separaciones químicas, deben ser hechas con gran cuidado, debido a las intensas radiaciones existentes.

Se sabe que las pilas de uranio actuales desarrollan potencias de muchos miles de Kw. Pero aun en una pila modesta, de 1.000 Kw. de potencia, se desintegran $3{,}37.10^{16}$ partículas por segundo: recordando que se llama "Curie" al número de desintegraciones por segundo que tienen lugar en un gramo de radium, resulta que la radioactividad que entra en juego en esta pila de 1.000 Kw. asciende a 1,81 millones de Curies. La radiación gamma de esta tremenda fuente presenta graves dificultades para las medidas de protección, pues sus efectos son letales para cualquier ser viviente, aunque esté a varios metros de distancia.

Además de la extracción del plutonio, se procede también a la extracción de los diversos elementos radioactivos, de número atómico intermedio, que se forman como productos de la fisión de los núcleos de U-235. Estas manipulaciones también se efectúan con grandes precauciones y con sistemas complicados de protección. Dado que el Pu-239 goza, al igual que el U-235, de la propiedad de fisionarse por efecto de los neutrones lentos, es factible realizar una fuente de energía nuclear de dimensiones muy reducidas, capaz de desarrollar energías considerables en brevísimo tiempo.

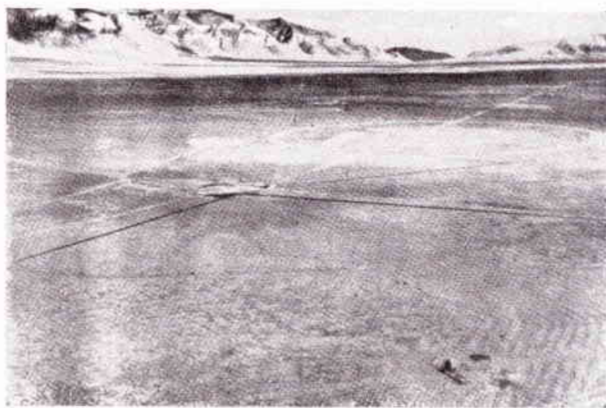


**Fig. 46.**— Vista de Los Álamos, donde se experimentó la primera bomba atómica.

La razón por la cual con el Pu-239 se puede hacer una reacción en cadena con una cantidad muy pequeña de material, es que, al contrario de lo que ocurre con la pila de uranio natural, con aquellos no hay ningún isótopo que impida la propagación de la reacción. En otras palabras, no hay necesidad de grafito o de agua pesada, y por tanto la masa está constituída por material fisionable.

## El explosivo atómico

El principio en que se basa el explosivo atómico es muy sencillo.

Examinemos la figura 45: como se ha dicho al hablar de la pila de uranio, si la masa no es suficientemente grande, los



neutrones tienen un alto promedio de [illegible] sin producir la fisión de los otros núcleos y entonces no se obtiene una reacción en cadena.

Se comprende, por tanto, que existe una *masa crítica*, aun para el plutonio, o el U-235, de modo que si se toma una cantidad de material fisionable inferior a esta masa crítica, no se obtiene una reacción en cadena; si, viceversa, se pasa de esta masa crítica el Pu-239 o el U-235, dan lugar a una reacción en cadena que se desarrolla de una manera tan violenta que produce una terrible explosión.

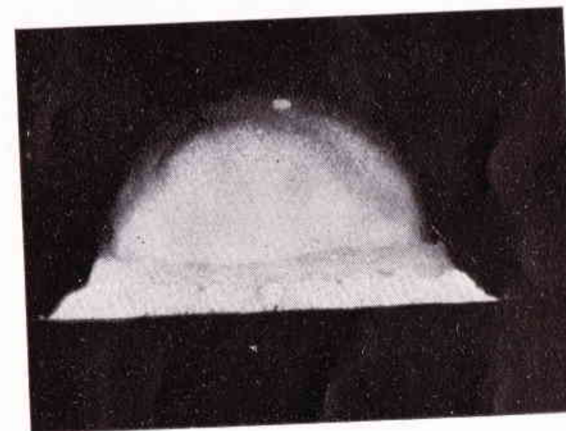


**Fig. 47.**— Nube luminosa producida en el momento de la explosión. (Fotografía tomada aproximadamente desde unos diez kilómetros de distancia.)

Para realizar una bomba atómica, basta, pues, con tomar dos masas de Pu-239 o de U-235, de tal manera que cada una, por separado, sea *inferior a la masa crítica*, pero cuyo conjunto, de ambas unidas, *sea superior a la crítica*. El procedimiento es, pues, sencillo; mientras las dos masas están separadas, no hay ningún peligro de explosión, ni por choques ni por incendio ni por otras causas. Si, en cambio, por medio de un dispositivo mecánico se proyectan las dos masas una contra la otra, la masa resultante supera a la crítica y la explosión se verifica de una manera fulminante. Nótese que en la práctica, una reacción en cadena se inicia automáticamente en una masa de material fisionable superior a la masa crítica, aun sin recurrir a una fuente de neutrones para producir la fisión inicial. Esto acontece porque

en la vecindad de la corteza terrestre siempre hay neutrones presentes, debidos a la radiación cósmica o a procesos radioactivos naturales.

Ya que el Pu-239 constituye el explosivo con el cual se hacen las bombas atómicas, en lo que respecta a su producción, daré el dato siguiente: una modesta pila de uranio de 1.000 Kw. de potencia, funcionando de modo continuo, produce un gramo de plutonio por día.

La figura 46 muestra una vista de Los Álamos, donde se experimentó la primera bomba atómica. Enormes precauciones habían sido tomadas por los observadores por no conocerse con certeza cuáles serían los efectos que podrían derivar de la explosión.

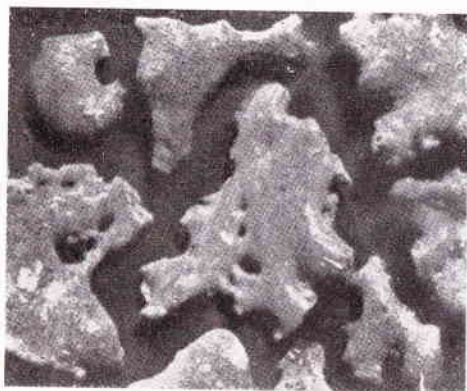


**Fig. 48.**—Tierra completamente fundida extraída del cráter provocado por la explosión.

En la figura 47 se ve la nube luminosa producida en el momento del estallido: nótese que esta fotografía fué tomada aproximadamente desde unos diez kilómetros de distancia del lugar de la explosión.

El efecto destructivo sobre los cuerpos de los alrededores es debido, más que al enorme desplazamiento del aire, sobre todo a la imponente cantidad de calor que se desprende de la masa detonante a temperatura altísima. En el experimento de Los Álamos se sujetó la masa a una torre de acero, que se fundió completamente y se volatilizó.

En el cráter cavado por el estallido se comprobó que la tierra estaba completamente fundida, como se puede ver en la figura 48.



Todos los cuerpos próximos al cráter tenían una intensa radioactividad. En la figura 49 se ve justamente una operación de medida de la actividad de un pedazo de material extraído del cráter.

Se pueden apreciar efectos mucho más notables en la fotografía de la explosión producida por la bomba atómica que se experimentó en Bikini. En la figura 50 se ve precisamente la fase inicial de la explosión. El estallido es tan rápido que se observa una enorme columna central de agua, a pesar de que, en sus alrededores, el mar está todavía perfectamente tranquilo.



**Fig. 49.**—Operación de medida de la radioactividad de un pedazo de material extraído del cráter.

La figura 53 muestra otra vista impresionante del estallido de la bomba atómica en Bikini.

En lo que respecta a los efectos que pueden derivarse de la explosión de una bomba atómica sobre los seres vivientes que se encuentran en su zona de influencia, dejo la palabra al profesor Frangella, que expondrá este problema, que es de su competencia, en próximas páginas. Quiero sólo señalar someramente las manifestaciones físicas que producen estos efectos. Como se dijo poco antes, la explosión de una bomba atómica desarrolla

una enorme cantidad de calor y la temperatura de la atmósfera circundante, asciende a cifras fabulosas; una luz enceguecedora se desprende de la nube, y el aire, bruscamente recalentado, se dilata violentamente, provocando una espantosa deflagración. Simultáneamente se emiten intensos rayos X y gamma, acompañados de una fortísima emisión de neutrones.

Además de la fuerte radioactividad debida a los productos de la fisión, prácticamente todos los cuerpos que se encuentran dentro de un cierto radio del lugar del estallido, se vuelven tam-

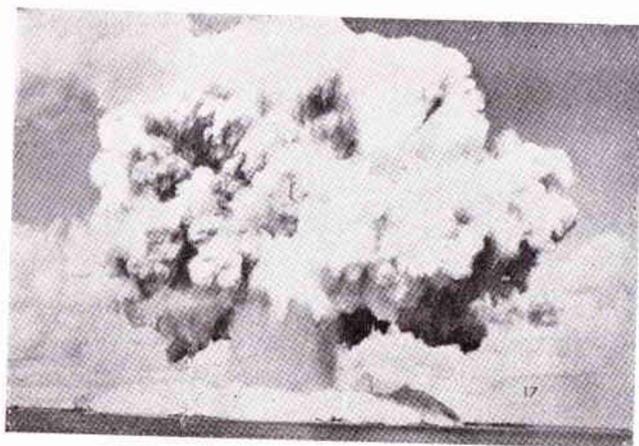


Fig. 50.— Fase inicial de la explosión de Bikini, en bomba submarina.

bién radioactivos y pueden producir efectos dañinos, aunque retardados. Hay, pues, una infestación radioactiva de larga duración en toda la zona afectada.

Señalados los terribles efectos destructivos de la energía atómica, no terminaré sin antes hablar de algunos empleos pacíficos que, en un futuro próximo, podrán contribuir a mejorar el bienestar de la humanidad.

La primera aplicación posible y evidente de la energía atómica es la utilización de la energía térmica desarrollada por una pila.

La figura 51 muestra esquemáticamente un ejemplo de aprovechamiento de una pila de uranio para la producción de energía eléctrica. A la izquierda se ve la pila completamente rodeada por material de defensa contra las radiaciones. El calor desarrollado por la pila calienta un líquido que circula por medio de una



pone en contacto con un serpentín en el cual circula agua que eleva su temperatura hasta transformarse en vapor. El vapor acciona una turbina conectada con un generador de corriente eléctrica. De este modo se obtiene una central eléctrica termonuclear.

Una de las grandes ventajas del uso de la energía atómica es la eliminación de las dificultades que se relacionan con el transporte de los combustibles comunes. En realidad bastan cantidades

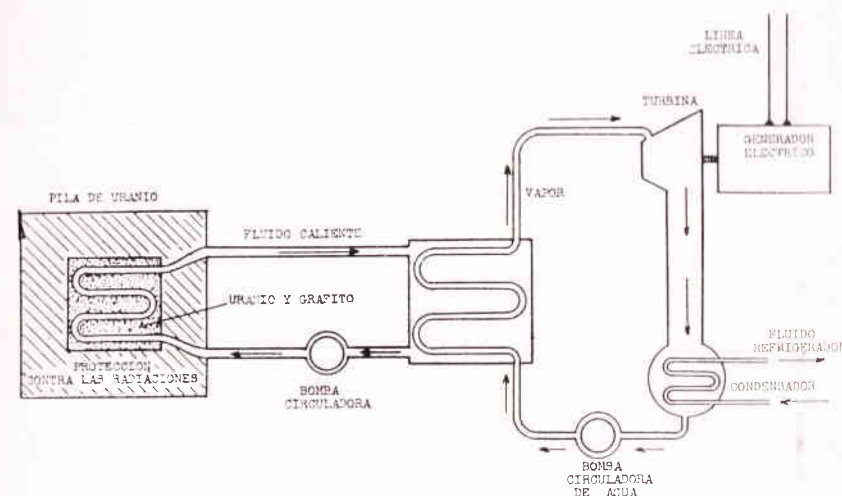



Fig. 51.

mínimas de uranio en comparación con las cantidades correspondientes de carbón y nafta necesarios para obtener la misma potencia.

Por esta razón el "combustible nuclear" podrá desempeñar, en el futuro, un papel decisivo en la evolución de la economía de una nación, particularmente en lo que se refiere al desarrollo de las regiones de difícil acceso.

Otra aplicación muy importante es la relativa a la producción en cantidades notables de cuerpos radioactivos artificiales.

Al analizar el uranio metálico, que se extrae de una pila que ha funcionado durante un cierto tiempo, se observa una gran radioactividad. Por eso se pueden separar, por métodos químicos, muchos isótopos radioactivos de los elementos que se encuentran

ya muchas aplicaciones en varias ramas de la ciencia, y particularmente en medicina.

Además se pueden introducir en la pila otros cuerpos que se vuelven radioactivos por efecto del intenso flujo de neutrones presentes en la pila. De esta manera, se pueden volver radioactivas ciertas substancias con el fin de introducirlas en los seres vivientes para hacer radioterapia interna. A propósito, es interesante notar que la producción de isótopos artificiales se obtiene automáticamente y son subproductos de una pila de uranio. Simultáneamente se obtiene también como subproducto el U-239, cuyos efectos mortíferos ya son demasiado conocidos por la humanidad.

Es evidente, pues, que en torno a las futuras centrales termonucleares se desarrollarán varias actividades colaterales para la utilización tanto de los isótopos radioactivos como del plutonio.

Termino formulando votos para que los hombres puedan dirigir su ingenio hacia la búsqueda de nuevas aplicaciones de esa tremenda fuente de energía, consagrándola, no a la destrucción de seres vivientes, sino al progreso de la ciencia y al bienestar de la humanidad.



## LAS EXPLOSIONES ATOMICAS DE BIKINI

Con el objeto de estudiar distintas formas de hacer explotar las bombas y observar los resultados de su estallido se eligió un pequeño grupo de atolones, situados en el océano Pacífico. Uno de ellos, el de Bikini, tiene un lago que permitió que se colocaran una serie de barcos en los que había numerosos animales que han servido para estudiar el efecto de las radiaciones. De los 97 barcos se hudieron 14 y del resto todavía hay algunos en observación en puertos del Pacífico, imposibilitados de movilizarse, sea por alteraciones de su estructura o porque conservan un gran poder radioactivo que hace imposible tripularlos. Desde los días de la experiencia de Bikini hasta hoy, los hombres de ciencia están analizando las observaciones hechas en aquella oportunidad. Como se comprenderá sus conclusiones son aún incompletas.

Las experiencias de Bikini consistieron en la explosión de dos bombas atómicas. La primera se efectuó el 1º de julio de 1946, constituyendo la llamada "prueba Able", y fué lanzada desde una fortaleza volante, explotando a algunos centenares de metros por encima del agua. Por efecto de la explosión el agua fué empujada hacia abajo unos cuantos metros, elevándose después. El saldo fué: un barco incendiado y tres severamente averiados. El lanzamiento de la segunda se realizó el 25 de julio, y se conoce como "prueba Baker". En ella la bomba fué colocada a una profundidad de algunos metros. En el momento de la detonación surgió una columna luminosa que ascendió a unos 1.000 metros, luego se rompió bañando a casi todas las embarcaciones con agua fuertemente radioactiva. Nueve barcos se hundieron y otros ocho quedaron prácticamente inservibles. Nadie dudaba de su eficacia para hundir barcos, pero lo que se quería era valorar su poder y sus efectos.

En la primera prueba, cuando la bomba explotó en el aire, se vió que todos los barcos, en un radio de un kilómetro se hundieron o fueron seriamente dañados. En la segunda prueba, o sea cuando la bomba explotó debajo del agua, se vió que aparte

por la bomba, aparecía una nueva arma: la dispersión de toneladas de agua radioactiva.

Si todas las embarcaciones hubieran estado con su tripulación completa, 35.000 hombres hubieran muerto ese día. Suponiendo que se hubiera lanzado esa bomba en el puerto de Nueva York, 2.000.000 de muertos podrían ser el saldo inmediato, fuera de los que perecerían ulteriormente por los efectos tardíos de las radiaciones.

De los 3.700 animales de experimentación utilizados en Bikini, al cabo de un año 2.700 habían muerto.





**Fig. 52.**—Estallido de la bomba en la "prueba Able", el 1º de julio de 1946. Tirada desde un avión, se hace estallar a la distancia aproximada de mil metros de la superficie. La fotografía, sacada desde avión, muestra un verdadero hongo de fuego por debajo del cual hay una intensa nube, dispuesta como una gran sombrilla.



Fig. 53.—La otra bomba que estalló en el mismo lago de Bikini, explotó sumergida en el agua. En el instante de la detonación se vió levantarse una gran columna de fuego por encima de la superficie del agua y debajo de ella otra columna más pequeña formada por agua rodeada en su base, contra el mar, de un círculo de espuma y humo. Fotografía tomada desde avión.

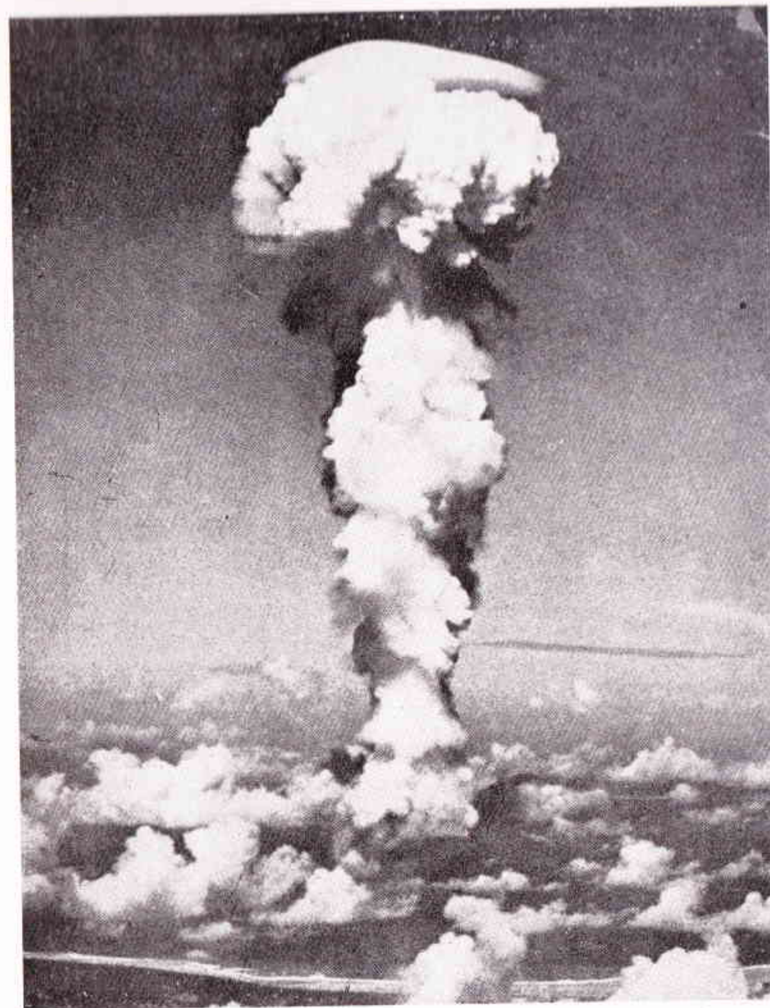


**Fig. 54.**— "Prueba Able". Seis minutos después de la explosión la gran columna sigue ascendiendo y está a 5.500 metros por encima de la laguna de Bikini. Bien por encima de la columna se distingue una capa blanca que se produce por condensación del vapor de agua arrastrado por la columna caliente, en forma de cristales de hielo.



**Fig. 55.**— La bomba atómica explota debajo del agua (entre 5 y 27 metros) el día 25 de julio de 1946, en Bikini. Se levanta una gruesa c
agua precedida de otra más pequeña formada por vapor de agua. A los pocos segundos la columna asciende a 1.675 metros, para luego
cayendo toneladas de agua radioactiva sobre los barcos. A la derecha y abajo de la columna acuática, se ve el barco de guerra "Arkansas
mente colocado, levantado por la fuerza de la explosión. De los barcos más alejados se ven salir columnas de humo probablemente de
pintura quemada por el gran calor. Fotografía tomada desde la playa, con máquina que funciona automáticamente.

# LA EXPLOSIÓN ATÓMICA DESDE EL PUNTO DE VISTA MÉDICO

## Efectos inmediatos, mediatos y alejados sobre los organismos y las zonas afectadas por las radiaciones y la radioactividad residual

**Prof. Dr. ALFONSO FRANGELLA** *

La energía nuclear o atómica, tal como la hicieron suponer las especulaciones teóricas es, en su liberación, fuente de formidables energías que han podido y pueden ser utilizadas en operaciones bélicas. Este hecho hace surgir una serie de nuevos problemas, todos de muy grande importancia, entre los cuales se destacan de manera fundamental los de orden médico derivados de la explosión de bombas atómicas.

Desde que se supo utilizar la energía hubo de buscarse su rápida liberación, especialmente para fines militares, cuyo resultado es la explosión de los materiales afectados: pólvora, dinamita, TNT, etc. Esta explosión tiene como consecuencia producir, en forma instantánea, muy grandes presiones con emisión de radiaciones caloríficas y luminosas; energías que nacen por la rotura de la periferia o corona electrónica del átomo —sin intervención del núcleo—, el cual permanece en reposo o equilibrio no obstante acontecer una verdadera catástrofe en su vecindad.

De pocos años atrás (1945) se principió a utilizar la energía atómica o nuclear con las mismas finalidades, lo cual apareja la rotura del equilibrio del núcleo. Este fenómeno da lugar a la liberación de energía química del mismo tipo de la obtenible en la combustión, pero se agrega algo más trascendente: la emisión de radiaciones de otro orden —mucho más cortas— que las hace más penetrantes y poderosas, tales como las corpusculares

* Subdirector del Instituto de Radiología y Ciencias Físicas de la Facultad de Medicina.

beta y alfa, aunque estas más raramente, con sus respectivas cargas de electricidad negativa y positiva; de otras sin carga: los neutrones, y otras electromagnéticas del tipo ultravioleta y gamma, explicadas en páginas anteriores por el Prof. Ingeniero W. Hill, todas las cuales obran de manera particularmente enérgica sobre cualquier ser vivo. A esto se suma, además, la radioactividad provocada, a punto de partida de la fisión del U-235 o plutonio, que da lugar a isótopos radioactivos cuya actividad puede prolongarse por días, meses y años (radioactividad residual). Entonces, como consecuencia de una explosión atómica de gran magnitud (bomba atómica) hay, pues, liberación simultánea de energía química y nuclear produciendo los tremendos efectos que, desde el punto de vista médico, en seguida veremos.

En todas las explosiones atómicas experimentales habidas hasta ahora: en el desierto de Nuevo México, en el atolón de Bikini, así como en las tres o cuatro más recientes —mantenidas en riguroso secreto— los aparatos de medida se hallaban cercanos al lugar en donde sucedió la explosión, no así los observadores visuales, quienes se situaron a distancia no eficaz, es decir, a varios kilómetros del lugar de explosión, lo cual alcanzó para comprobar fenómenos supuestos teóricamente y derivados de las formidables energías puestas en libertad: explosión gigantesca, fuego, superpresiones, vientos huracanados, energía radiante, etc.

La explosión de las bombas atómicas señalan un poder a, por lo menos, 20.000 toneladas de TNT, lo cual ocasiona un desplazamiento de aire en tal magnitud que produce hiperpresiones jamás registradas en la tierra, al menos desde que existen seres vivos en ella. La ola de presión genera vientos a una velocidad de 800 a 1.600 kilómetros por hora, es decir, cinco a diez veces más violentos que los más grandes huracanes conocidos.

El efecto expansivo o detonante, desde el punto de vista mecánico o poder de destrucción, supera miles de veces a los explosivos más poderosos. Con la primera experiencia de Nuevo México, en donde fué aniquilada la torre de acero y cemento que soportaba la primera bomba, se puede deducir lo que pasaría a una aglomeración humana colocada en ese terrible trance. Hasta la fecha tal cosa no ha acaecido, dado que en las dos oportunidades donde la energía atómica provocó la muerte, por necesidades bélicas, en Hiroshima y Nagasaki, los estallidos tuvieron lugar, por lo menos, a varios centenares de metros de altura y no en medio de las personas; sin embargo, los efectos fueron también desastrosos.



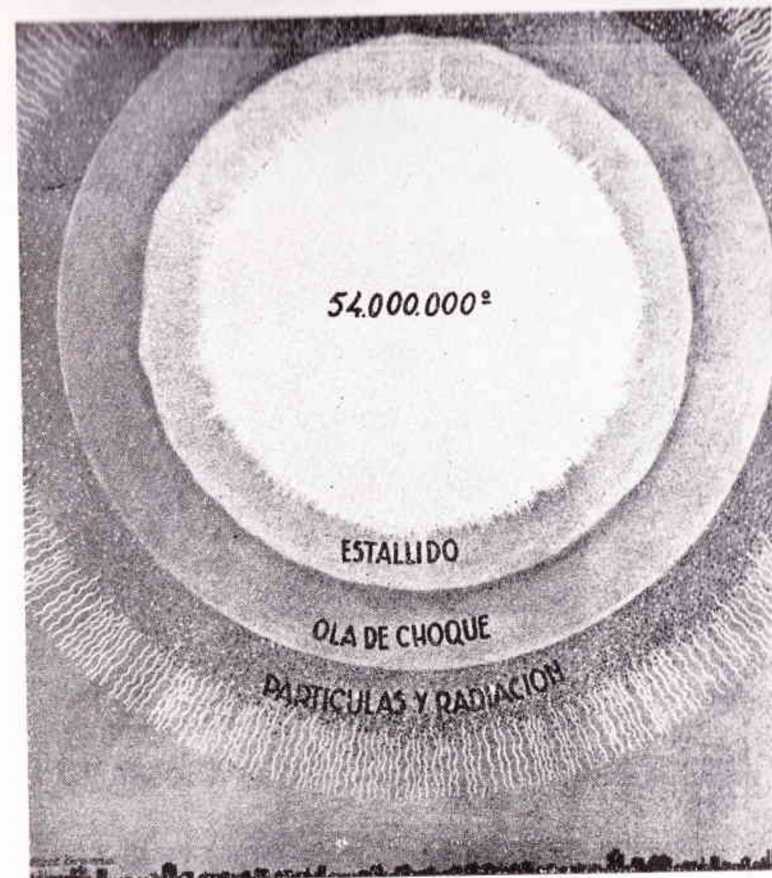



Fig. 56.—Esquema que muestra el caudal de energía y el desplazamiento exeéntrico de la misma. En la zona de estallido (centro) hay lugar a la producción de 54 millones de grados de temperatura; en seguida la ola de hiperpresiones gaseosas y luego la de partículas (neutrones en su mayoría) y radiaciones gamma.

Al fenomenal efecto destructor mecánico y cinético se suma el térmico-radiante (inmensa bola de fuego), más el similar al de los rayos X y cuerpos radioactivos, pero con una cantidad de energía liberada, de tal magnitud, que ninguna vida puede sostenerse si es alcanzada en forma global y sin protecciones por la avalancha de corpúsculos y radiaciones a menos de un kilómetro de distancia del punto de la explosión. Ello es explicable, ya que sabemos por las experiencias de radiobiología, desde hace

más de cuarenta años, que el hombre y los animales de laboratorio sólo soportan pequeñas cantidades de energía radiante de la gama de los rayos röntgen y de los cuerpos radioactivos administrados en forma total. Estableciendo una relación entre las irradiaciones totales y focales o circunscriptas, en base a lo que hacemos diariamente para los tratamientos, dicha relación es de

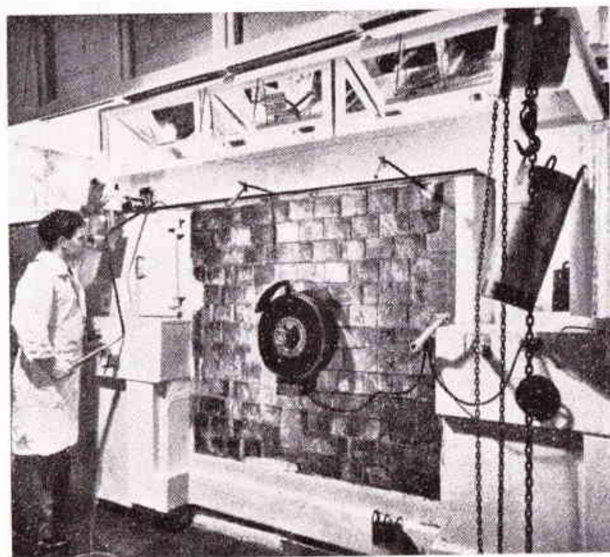


Fig. 57.—Gruesas paredes que separan los elementos radioactivos del laboratorio. A la izquierda, frente a donde se halla de pie el técnico están los instrumentos de comando a distancia.

1 a 50; en otras palabras: si se determinan esas cantidades en unidades r. (las empleadas para medidas en röntgen y curieterapia) el cúmulo de energía es de 5 a 50 r. por sesión para la irradiación experimental o terapéutica total, no debiéndose pasar de 250 a 300 r. por serie. En cambio, la irradiación local, focal o circunscripta es mucho más tolerada, pudiéndose soportar 1.200 r. o más por sesión. Se deduce cual puede ser el efecto de miles de r. sobre la totalidad del organismo aunque sólo obren en una fracción de segundo.

Si bien es cierto que el efecto radiante es mucho mayor extendido en el tiempo que operando en forma instantánea, esto es cuestión de cantidades: la explosión de una bomba atómica libera energía equivalente, en rayos gamma, a miles de kilos de radium,



y si un ser vivo es atacado por ese diluvio

epicentro, será achicharrado por terribles quemaduras como si fueran producidas por el fuego, dado que las grandes cantidades de material radioactivo dan lugar a pronunciadas elevaciones de temperatura.

En la zona epicéntrica de la explosión, es decir, hasta un kilómetro o un kilómetro y medio del punto de estallido, la des-

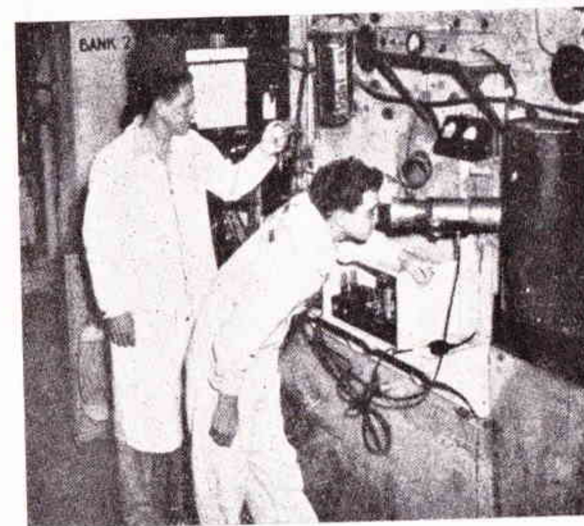


Fig. 58.—Aparatos que registran, a distancia, a través de espesas protecciones de cemento, agua y plomo, el funcionamiento de una pila de uranio.

trucción se opera por un enorme desarrollo de energías mecánicas, térmicas, cinéticas, complementada su acción destructora, como hemos dicho, por la energía radiante. Esa convergencia de energías verdaderamente ciclópeas en el punto máximo de acción, semejante al efecto sobre la torre de Nuevo México, pulveriza o volatiliza los organismos vivientes. En Nagasaki —ciudad de tipo moderno— quedaron los armazones retorcidos de los edificios de concreto sin nada en su interior; en Hiroshima, sobre una población de 400.000 habitantes quedaron 100.000 muertos y 120.000 heridos, de los cuales 50.000 lo eran de gravedad. Los cadáveres —reconocibles como tales— estaban completamente carbonizados. Cuenta el Dr. Serber, quien hizo patética descripción por haber estado en el teatro de los acontecimientos, que vió

pilas de huesos y cantidad de gente con "horribles heridas", muchas de las cuales parecían gangrenosas; otras muchas con aspecto de "malas quemaduras de sol", tomando en algunas sólo un lado de la cara o en forma de sombras en punta desde la nariz proyectándose sobre la mejilla o la oreja. Eran sombras a la inversa que permitían orientar la dirección del estallido; otras con pequeñas heridas o sin ninguna, pero que sin embargo murieron antes de una semana, habiendo presentado grandes inflamaciones de la boca y la faringe, signos premonitorios de un estado leucémico que rápidamente los llevó a la muerte. De este cúmulo de graves accidentes, parecidos, aunque de mucho mayor entidad, que los producidos en el laboratorio con los animales de experimentación utilizando radiaciones semejantes, hay lugar a tres tipos de efectos: los inmediatos, los mediatos y los lejanos o diferidos.

## Efectos inmediatos

Por la descripción que antecede es posible catalogar como efectos inmediatos de la explosión de la bomba atómica, en primer término: la destrucción en masa con volatilización de la materia inerte o viviente, luego la calcinación de la tierra y carbonización de los seres vivos a medida que la distancia aumenta o que se interponen eventuales protecciones, sin duda ninguna aleatorias e insuficientes desde todo punto de vista, pero que atenúan en algo la avalancha de energía; la muerte repentina por shock, las horribles heridas con necrosis y gangrena necesariamente letales y las lesiones de aparente quemadura o de aspecto mínimo que permiten sobrevivir hasta una semana o diez días.

No obstante la brevedad de este capítulo que comprende los efectos inmediatos, son éstos los que producen consecuencias más desastrosas y por ende mayor mortandad.

## Efectos mediatos

La explosión origina rayos gamma que indudablemente son absorbidos con rapidez por la materia ambiente, lo cual hace que pierdan parte de sus efectos. También se liberan cantidades enormes de substancias radioactivas provenientes de la fisión del U-235 o plutonio —los únicos empleados hasta hoy como material fisionable para bombas ató-



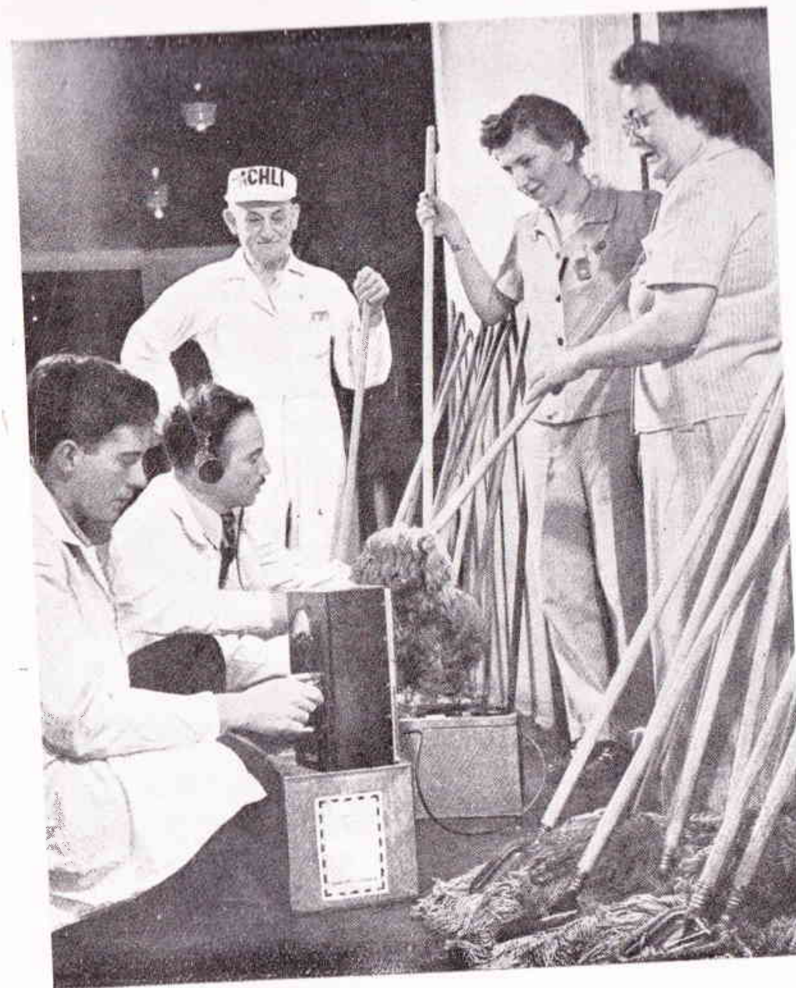


**Fig. 59.**—Los polvos radioactivos que pueden saturar el ambiente de los laboratorios se adhieren en forma imperceptible a la piel y ropas; de ahí las medidas extremas que se toman para descubrir la presencia de los mismos. En el grabado se ve cómo se examinan diariamente, en los laboratorios de energía atómica, las escobas e implementos de las limpiadoras, con aparatos registradores ultrasensibles.

micas— con gran cantidad de neutrones, capaces de llegar a un kilómetro y medio de distancia y provocar radioactividad.

Los átomos del aire (nitrógeno, oxígeno, gases raros), como del polvo y componentes del terreno (sodio, potasio, fósforo, calcio, hierro, etc., etc.), por el bombardeo neutrónico intensísimo se vuelven radioactivos, transformándose en radioisótopos de vida media más o menos larga. Estos elementos actuarán sobre los individuos tanto en el lugar de la explosión y sus alrededores como a mucho mayor distancia, por las corrientes de aire y los vientos que fácilmente pueden transportar estas invisibles nubes radioactivas. La atmósfera, las aguas, los vegetales, el medio ambiente, todo puede ser saturado por radiaciones nocivas capaces de esterilizar, por tiempo variable, vastas extensiones.

Acontece, pues, que hay una irradiación maciza o aguda de efecto brutal que pronto se agota, quedando la proveniente del terreno, por depósito en éste de radioelementos neoformados, que da la radioactividad residual.

ERITEMA (enrojecimiento de la piel).— La irradiación aguda, siempre y cuando sea de un caudal inferior a 2.000 r., lo que parece acontecer después de 2.500 metros del punto de la explosión, produce síntomas objetivos conocidos por cualquier röntgenólogo. Consisten en la producción de eritemas fugaces, de algunas horas de duración, como consecuencia de haber sido atacada la piel por los rayos. Este estado puede objetivarse mediante la luz de Wood, o sea una irradiación ultravioleta de onda muy corta, no percibida por nuestra retina, filtrada por un cristal de óxido de níquel, la que permitiría ver en la oscuridad la fluorescencia de la zona afectada.

Alrededor de los ocho días aparece la subreacción secundaria o verdadero eritema de un color rojo intenso. Esta segunda onda de eritema, en oposición a la fugaz primitiva, se acompaña con sensación de calor, de tensión sin verdadero dolor; en pocas palabras, se experimenta la misma sensación objetiva y subjetiva que la del eritema solar intenso. Hacia el décimo día aparecen verdaderas flictenas vesiculosas que levantan la piel y dan la misma impresión que las quemaduras de segundo grado por el calor. Las numerosas vesículas se hacen confluentes, apareciendo una superficie completamente desepidermizada, rezumante y muy vascularizada a causa de que los capilares del dermis quedan al descubierto, y esto los hace sangrar al menor contacto. Por seis u ocho días persiste un estado estacionario que puede llegar a una reac-



ción difteroide, caracterizada por un recubrimiento de falsas membranas y seguir luego la reparación. Las superficies sin epidermis se retraen y se cubren de epitelio, por segunda intención en forma de islotes o puentes primero, y luego se unen; en el término de cinco a seis semanas la reparación es aparentemente completa desde el punto de vista macro y microscópico. Esta evolución relativamente favorable acontece en los que recibieron una cantidad no grande de radiaciones.

MUCOSAS.— Los efectos sobre las mucosas son muy semejantes a los cutáneos, con la diferencia de que las reacciones son más intensas por la mayor sensibilidad de las mucosas de tipo malpighiano o pavimentoso estratificado, pudiendo alcanzar las reacciones a los estados difteroides con recubrimiento de falsas membranas. Técnicamente se les llama radioepitelitis, de las cuales hay una serie de grados o variedades que es innecesario detallar aquí.

DEPILACIÓN.— Se asocian también otros fenómenos: la caída espontánea de los cabellos, precedida de un día o dos por la facilidad de esa caída por la más ligera tracción sin producir dolor. Después del ataque radiante, a los pocos días, los cabellos se hallan flojos en sus folículos y no ofrecen resistencia alguna a su remoción. Por el 15º día en adelante la caída se produce espontánea, para dar lugar a una pelada completa al cabo de tres semanas.

Si las dosis pasaron de 1.500 r. quedará una depilación definitiva, a menudo acompañada de una pigmentación más o menos oscura que también desaparece en pocas semanas, sin perjuicio de que por susceptibilidad particular de los sujetos esa pigmentación quede crónica durante meses o años. La depigmentación se hace por el doble mecanismo de la descamación y reabsorción.

La depilación no es igual para todos los tipos de pelos que hay en el organismo: los más sensibles son los cabellos, en ambos sexos; luego la barba, las cejas, los pelos de la axila, los pelos del pubis, los pelos clareados de otras regiones y, por último, los más resistentes son los vellos.

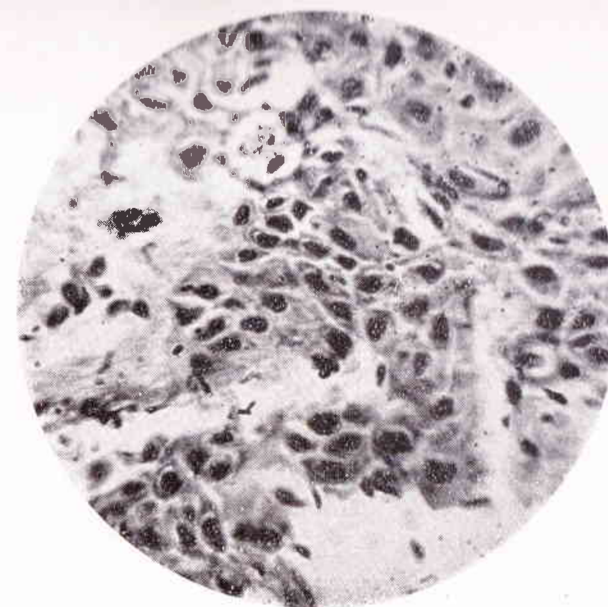
DOSIS BRUTALES. NECROSIS. GANGRENA.— Si las dosis sobrepasan 2.500 r., cosa corriente en la explosión atómica dentro del radio de un kilómetro y medio del punto de la deflagración, puede haber lugar a la necrosis total o parcial de la piel, con una incubación de uno a ocho días, según el caudal radiante recibido, y su

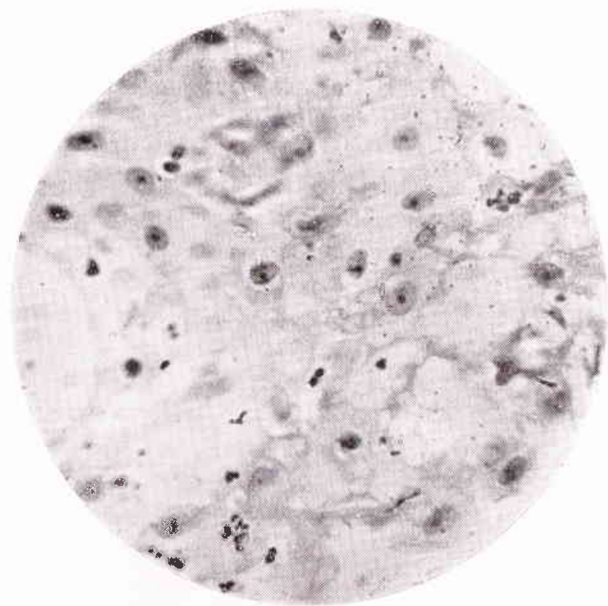
efecto es tanto más precoz cuanto mayor haya sido la dosis. En un principio los fenómenos son semejantes a los descriptos hace un momento, de acción reversible o reparable, diferenciándose de éstos por su aparición más temprana. También se hace presente un enrojecimiento o eritema con sensaciones de picoteo, prurito, tensión y calor. El enrojecimiento se hace cada vez más vivo, hay lugar a tumefacción y edema; el prurito se transforma en terrible dolor y el enrojecimiento vira a un color violáceo. Luego, las vesículas, abundantes en secreción, se abren y desnudan el dermis; pero la cosa no para aquí, pues éste, también afectado, se ulcera, cobrando las lesiones un aspecto gangrenoso. En los días que siguen los tejidos se continúan desmoronando por la necrosis, la que incluye también fascias, músculos y aun los huesos.

Si las superficies afectadas son muy extensas, la vida se vuelve imposible por efectos de la infección secundaria que fatalmente sobreviene y por las grandes reabsorciones tóxicas que tienen lugar. En cambio, si se sobrevive, las lesiones que prácticamente no tienen ninguna tendencia a la curación se hacen crónicas. Las ulceraciones de bordes cortados a pico, de fondo recubierto por capa saniosa con supuración moderada y algunas costras en forma de escaras, tienen una evolución absolutamente tórpida. En algunos casos se puede llegar a la curación, por la caída de las escaras, pero esto al cabo de meses o años y la reparación de una radionecrosis será siempre defectuosa porque las cicatrices son fibrosas, retraídas, adheridas a los planos profundos y con alteraciones marcadas de la pigmentación, todo lo cual muestra profunda atrofia con vitalidad precaria. A despecho de producirse cicatrices, las más mínimas agresiones (roces, traumas, pequeñas infecciones, etc.) pueden traer el retorno de la radionecrosis, razón por la cual será necesario cuidar de manera especial esas zonas que fueron tan profundamente afectadas por las radiaciones.

EFECTOS MENOS INTENSOS POR LA DISTANCIA. CANCERIZACIÓN. Cuando las lesiones no fueron tan intensas, por la distancia, puede haber lugar a las llamadas radiodermitis que, naturalmente, pueden llevar en cualquier momento a la radionecrosis si esas zonas afectadas son traumatizadas o agredidas crónicamente, aun en forma mínima. Debemos agregar que esta radiodermitis, por las alteraciones biológicas que han experimentado los tejidos, son fuente de hiperplasias y transformaciones malignas con muy grande frecuencia.







**Figs. 60 y 61.**— Preparaciones microscópicas que muestran, la de arriba, un tejido en plena actividad vital, y la de abajo un campo similar con células destruídas, casi en su totalidad, después de haber recibido radiaciones gamma.

Esas lesiones son del orden de las queratosis, cornificaciones cutáneas, papilomatosis y epiteliomatosis del tipo espinocelular y muy raramente basocelular. También es posible llegar a ver cancerizaciones del tejido conjuntivo al producirse fibrosarcomas del dermis.

Otros órganos.— No sólo la piel y las mucosas pueden ser profundamente afectadas por las radiaciones. Otros órganos también son muy sensibles, como el estómago, los intestinos, las glándulas salivales, sudoríparas, mamarias en estado de actividad, etc., traduciéndose el ataque a los primeros por un cuadro tóxico de vómitos, deposiciones diarreicas y hasta sanguinolentas y, en las glándulas, por la supresión temporal o definitiva de las secreciones.

Las glándulas de secreción interna y el aparato de excreción urovesical, si se hallan en estado normal, resisten bien la agresión radiante, afectándose en forma inespecífica sólo cuando la absorción de energía fué grande.

Los órganos genitales, en su esfera reproductora, ya que en la de glándulas intersticiales o de secreción interna son refractarios, como los demás componentes del sistema endocrínico, son de muy grande sensibilidad a las radiaciones de los cuerpos radioactivos, los cuales provocan, según la dosis, la esterilidad temporaria o definitiva, por acción letal sobre las espermatogonias en el testículo o los folículos en el ovario; estos últimos son tanto más vulnerables cuanto más próximos se hallan a la madurez. Se explica entonces la acción electiva en el testículo porque en el momento de la irradiación muchas células germinativas pueden hallarse en reposo, no siendo sensibles, las que luego restablecerán la línea germinal y, en el caso del ovario, porque los folículos primordiales son menos sensibles, de donde se opera un efecto similar que en el testículo (efecto de castración temporaria). En cambio, cuando la intensidad de la irradiación o su prolongación en el tiempo es considerable, se produce en ambos órganos la castración definitiva.

Con respecto al embrión, estos tipos de radiaciones dan lugar al aborto radiante, a la producción de monstruosidades en el feto, reconocibles inmediatamente al nacimiento, o alteraciones distróficas de manifestación tardía.

Sangre. Órganos hematopoyéticos. Sistema retículoendotelial.— Los órganos hematopoyéticos y el sistema retículo-



grupo que estamos tratando y pueden experimentar profundas modificaciones aun bajo irradiaciones no muy fuertes. Esa sensibilidad es muy marcada para la *médula ósea, hígado hemopoyético, bazo, ganglios linfáticos, tejido amigdalino, placas de Peyer del intestino, timo, etc.*, aconteciendo en éstos lo mismo que en otros órganos de gran sensibilidad, como el testículo, por ejemplo. La acción radiante se efectúa en forma enérgica en las células fuentes o más embrionarias, agotándose así toda la línea por desaparición del primer eslabón de la cadena, tal como sucedería con un tanque lleno de agua que la va perdiendo por un grifo, sin reposición.

Neutrones.— Lo mismo que con las radiaciones del tipo gamma se ha visto con los neutrones, habiendo sido Lawrence, Tennant, Yamashita los primeros que hallaron estas modificaciones consistentes en la rápida despoblación de los órganos formadores de la sangre, con marcada disminución de los elementos figurados circulantes, fenómenos que se explican por el mismo mecanismo destructivo conocido para las radiaciones del tipo electromagnético o gamma.

Descenso de los glóbulos.— Las muy fuertes irradiaciones producen importantes descensos de los glóbulos blancos, rojos y plaquetas, pudiéndose llegar en algunos casos, aunque sólo durante pocas horas, a la aleucia que pone la vida en gravísimo peligro ya que se acompaña de un cuadro purpúrico-petequial de muy grande intensidad, al cual se unen fenómenos de colapso. Estos hechos fueron observados con frecuencia en Hiroshima y Nagasaki, por los médicos japoneses, seis a siete días después de haber soportado la explosión atómica a una distancia de un kilómetro y medio; más allá se vieron descensos globulares a 500.000 rojos y 500 blancos.

## Efectos alejados

Radioactividad residual.—Estos mismos fenómenos, pero de marcha más lenta, que desembocan después de un tiempo más o menos largo en leucemias de tipo mono o linfocitario y aun de tipo mielógeno, con anemias graves, profundos trastornos de la coagulabilidad de la sangre y fragilidad de los capilares, pueden ser producidos por la radio-

la vida media de los elementos residuales, vastas zonas afectadas por la explosión —mientras exista esa radioactividad— pueden dar lugar a graves alteraciones de los órganos formadores de la sangre o sistema retículoendotelial durante semanas, meses o años, dejando esas zonas afectadas como verdadera tierra maldita.

ÓRGANO DE LOS SENTIDOS. SISTEMA NERVIOSO.— En cuanto a los órganos de los sentidos y sistema nervioso, fuera de acciones indirectas de intoxicación con sus síntomas correspondientes, ninguna otra particularidad digna de señalar, si se exceptúa un efecto sobre los ojos en caso de dosis muy altas, las cuales provocan degeneraciones del epitelio palpebral, conjuntival y corneano con sus serias consecuencias; además, es posible la destrucción, aunque parcial, de la retina, por anulación en parte de la substancia cromática y vacuolización del citoplasma de las células retinianas, todo lo cual puede llevar a la ceguera. Hace poco la prensa ha dado noticias de la producción de esos accidentes en algunos de los sabios que trabajan con energía atómica, por efecto de los neutrones.

Resumiendo, tenemos, pues, que la explosión de una bomba atómica puede producir por lo menos efectos de tres tipos: *inmediatos*, *mediatos* y *alejados*.

*Los efectos inmediatos*, de consecuencias terribles por su tremenda potencia y por la rapidez de los mismos, son debidos a la conjunción de formidables fuerzas químicas y nucleares capaces de aniquilar sin dejar rastro a animales de gran talla y al hombre cuando son tomados en la proximidad de los puntos de explosión; algo más alejados se agregan los efectos de la producción de altas temperaturas con la destrucción consecutiva por este elemento a sus quemaduras inespecíficas y, por último, el efecto radiante del tipo gamma o sea las también llamadas "quemaduras por rayos", pero que, como hemos visto, tienen carácter especial y no son iguales a las producidas por el fuego.

*Los efectos mediatos*, fuera de la secuela de orden traumático o cicatricial de las quemaduras, etc., podemos agruparlos en la casi totalidad de los trastornos que se producen al nivel de los diferentes tejidos y órganos ya vistos y que necesitan un tiempo de latencia para su aparición, el cual oscila, según la intensidad de la radiación, entre cuatro y veinte días.

*Los efectos alejados* son los provocados por la radioactividad residual y no son de tanta intensidad como los mediatos: a veces



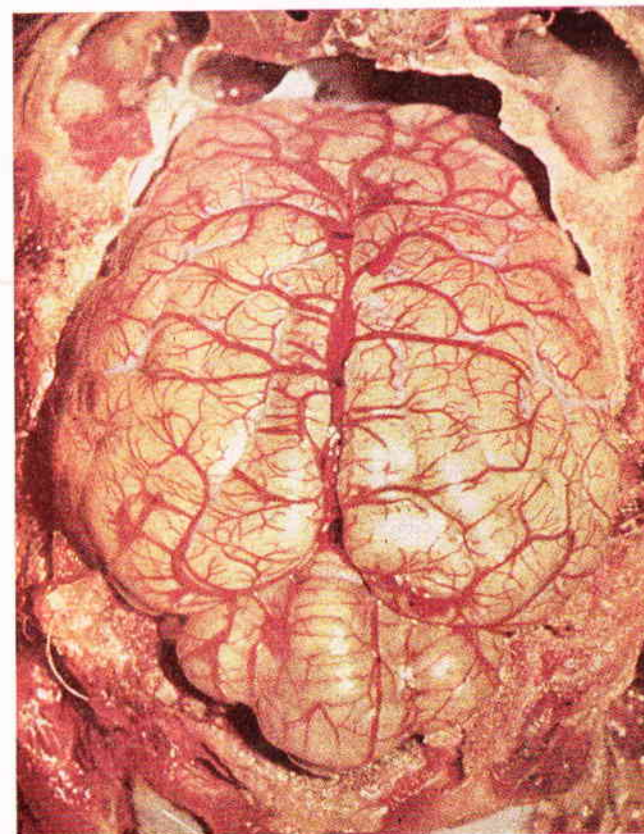


**Fig. 62.**— Cerebro de cabra, mostrando los vasos sanguíneos ensanchados y hemorragias, producidos por radiaciones atómicas. Animal de la experiencia de Bikini.



**Fig. 63.**—Depilación pronunciada, que tuvo lugar en esta japonesa, algunos días después de haber recibido radiaciones atómicas en Hiroshima.



**Fig. 64.**—Japonés de Nagasaki en estado preagónico, con gangrenas múltiples, especialmente visibles alrededor de la boca y cuello, a los ocho días de haber sido atacado a dos kilómetros de distancia de la explosión atómica.



Fig. 65.— Impresionante fotografía de inocentes niños cuatro días después de la explosión de Hiroshima, obligados a protegerse con máscaras para paliar el insoportable olor de la muerte.

tardan años en hacer su aparición; además puede haber lugar a trastornos de evolución invisibles, como la esterilidad en ambos sexos y hasta alteraciones transmisibles a la descendencia.

La mejor manera de compendiar lo que antecede es resumir brevemente a lo que ha llegado la Asociación Médica Americana deseando saber hasta dónde se había llegado en el momento, en los conocimientos en relación con la medicina atómica, reuniendo en junio de 1948 a los más destacados investigadores en este inexplorado campo.



Las conclusiones pueden esquematizarse en esta forma:

Los peligros de la radioactividad que siguen a la bomba atómica constituyen un terreno prácticamente desconocido para la medicina y su estudio demandará años. La fisión del uranio o el plutonio da nacimiento a considerable cantidad de nuevos elementos, habiéndose separado hasta ahora 34, cada uno de los cuales debe ser estudiado separadamente para conocer sus efectos en el organismo y qué es lo que puede hacerse para contrarrestarlos.

Casi todos esos nuevos elementos tienden a alojarse en la médula ósea donde destruyen las células formadoras de la sangre. Una cantidad tan pequeña como un millonésimo de gramo, de alguno de esos elementos, puede ser suficiente para causar la muerte.

El Dr. Stafford Warren, de la Universidad de California, quien anteriormente fué Jefe de Salud Pública del distrito de Manhattan, ha presentado los efectos de la radiación que observó en Hiroshima y Nagasaki dividiéndolos en esta forma.

1º) *Precoces.*— Después de los primeros tres días las víctimas comienzan a sufrir grandes náuseas; esto es ocasionado por la autointoxicación debida a células del cuerpo que han recibido impactos directos y que se están desintegrando. Este efecto tiene poca diferencia con el que produce el envenenamiento con rayos X. La intoxicación continúa durante unos diez días, después de los cuales se nota un aparente restablecimiento.

2º) *Más alejados.*— La víctima parece estar en perfecto estado de salud hasta que transcurren unas siete u ocho semanas. Entonces palidece y muere en un día o poco más sin que se pueda hacer nada para salvarla. Algunos hombres continúan trabajando, sin sospechar siquiera que están enfermos, hasta pocas horas antes de la muerte.

A través del período de restablecimiento ficticio las mortales radiaciones están destruyendo las células de las que se forma la nueva sangre; mientras tanto las células sanguíneas viejas mueren y son eliminadas de un modo normal. Pero no hay ninguna que las reemplace y cuando se llega a un cierto punto crítico se produce un colapso casi repentino.

Medios de protección.— En esa reunión se trató también de cuáles serían los medios más convincentes para la construcción de refugios contra el efecto radiante del explosivo atómico.

La principal dificultad radica en el hecho de que se necesitan diferentes materiales como corazas contra los rayos *gamma* y los extremadamente peligrosos rayos X. Los torrentes de neutrones, pesadas partículas nucleares con las que la raza humana no ha tenido experiencia previa, que exigen una protección especial. Los rayos *gamma* pueden ser detenidos por gruesas paredes de plomo o concreto, pero la cantidad de material requerida es fantástica. Tales muros pueden resultar de valor nulo contra los neutrones que deben ser "capturados", por átomos de otros elementos; la mejor "coraza" encontrada hasta el presente es el agua. Según los conocimientos actuales, los refugios más eficaces contra bombas atómicas serían los de gruesas paredes de concreto embebidas en agua, entre las cuales hay una capa líquida.

TERAPÉUTICA.— Como terapéutica, el principal problema de la medicina atómica consiste en extraer esos átomos radioactivos localizados en la médula ósea. Se han tentado lavajes de sangre que no han dado resultado, pues la cantidad capaz de producir la muerte es tan insignificante que basta que queden unos cuantos de ellos para que el peligro subsista. Una posibilidad, en la que se está trabajando sin mucho éxito, es la de reemplazar la médula ósea.

Entre las tentativas para conseguir eliminar los depósitos radioactivos, de débiles magnitudes, del sistema de defensas llamado retículoendotelial, parece dar cierto resultado las inyecciones de soluciones de un metal raro llamado zirconio.

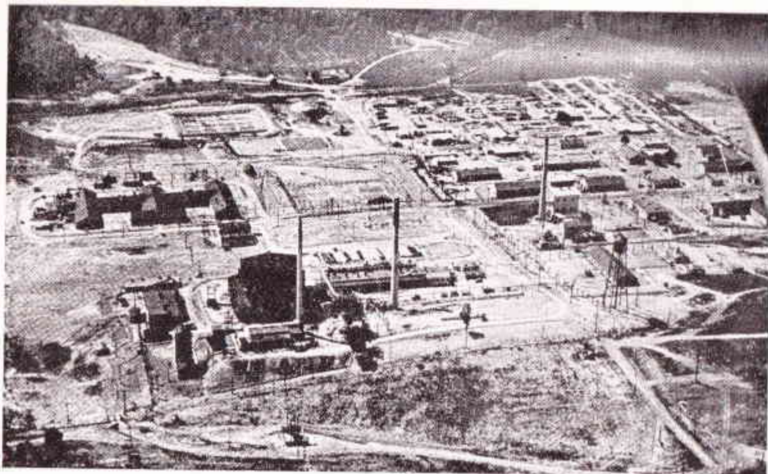
---

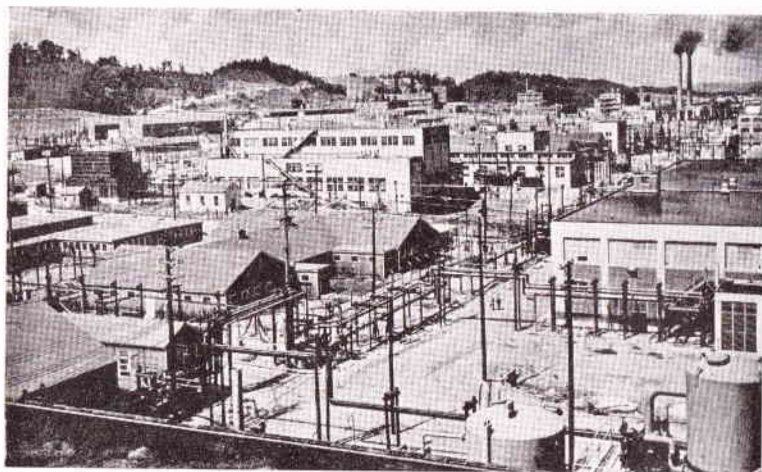
Estos inmensos horrores, que de multiplicarse aun en el futuro, porque ya hay noticias que las bombas atómicas han sido perfeccionadas, es decir, que se ha aumentado su poder, deben de hacer reflexionar profundamente. En una nueva guerra, en la que se empleara en gran escala la energía atómica, la devastación no sólo será terrible y sin precedentes en la historia de la humanidad, sino que se comprometerá con sus desastrosas consecuencias, probablemente para siempre, el porvenir de las generaciones venideras.



# LOS GRANDES LABORATORIOS DEDICADOS A TRABAJOS ATOMICOS

Para apreciar el esfuerzo hecho por todo el equipo de los aliados que trabajó en la obtención de la bomba atómica, publicamos algunas de las fotografías de las instalaciones que fué necesario construir. Ha sido un éxito de investigación y de construcción que es admirable e incomparable. La admiración no la despiertan sólo los sabios y los técnicos, sino todos los integrantes de los organismos encargados de la sincronización del trabajo. Con sacrificios enormes han llegado a realizar en un período cortísimo el fin que se proponían.





**Figs. 66 y 67.**—Dos plantas de trabajo de las instalaciones de Clinton, en Oak Ridge (Tennessee). Cada una de estas enormes plantas ha costado miles de millones de dólares y en ellas trabajan gran cantidad de personal que se dedica a una clase de tarea especializada dentro de la producción de bombas atómicas.



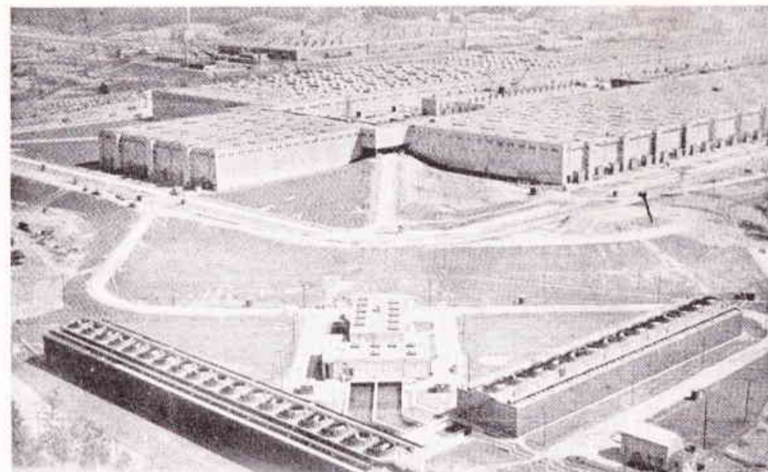


**Fig. 68.**—Otra planta de trabajo de las instalaciones de Clinton.

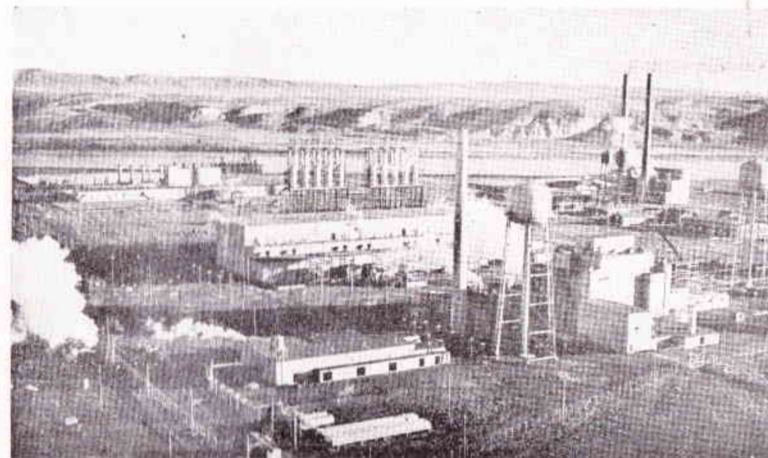


**Fig. 69.**—La planta de producción de Hanford Work, cerca de Pasco (Wash.).

## PUBLICACIONES DEL INSTITUTO DE RADIOLOGÍA Y CIENCIAS FÍSICAS

**Serie A: Sección Radiodiagnóstico.**

*Prof. Mario Cassinoni:*
"La radiología en los dolores lumbares y ciáticos."

*Prof. Pedro A. Barcia y Dr. Agustín Gorlero Armas:*
"La Radiología en el estudio de la vesícula biliar."

*Prof. Leandro Zubiaurre:*
"La fosa ilíaca derecha." (Su estudio radiológico.)

*Dr. Héctor Bazzano:*
"Invaginación intestinal." (Forma íleo-íleo-ceco-cólica.)

*Prof. Agdo. Manlio Ferrari:*
"Las neumopatías por agentes filtrables."

**Serie B: Sección Radioterapia.**

*Prof. Alfonso Frangella y Dr. Gerardo Caprio:*
"Cáncer de la mama."

*Dr. J. M. Fernández Colmeiro:*
"Temas de radioterapia." (Cáncer de la piel y cáncer de la laringe.)

**Serie C: Sección Física Médica.**

*Profs. Pedro A. Barcia y Mario Cassinoni:*
"Escuelas de técnicos en radiología médica y fisioterapia."

*Prof. Mario Cassinoni:*
"La física médica y su enseñanza." (Orientación y propósitos.)

**Serie D: Sección Enseñanza Técnica.**

*Sr. Gabriel Benquet:*
"Röntgenexposígrafo."

*Br. D. Israel Crespo:*
"La técnica radiográfica en el lactante."

*Sr. Gabriel Benquet y Br. José A. Pieroni:*
"Preguntas y respuestas." (Sobre conocimientos básicos que debe poseer un técnico radiólogo.)

*Br. José A. Pieroni:*
"Nociones de osteología."

*Sr. Gabriel Benquet y Br. José A. Pieroni:*
"Técnica radiográfica."

**Serie E: Sección Divulgación.**

*Profs. P. A. Barcia, M. Cassinoni y L. Zubiaurre:*
"Medio siglo de rayos X."

*Profs. P. A. Barcia, W. Hill, N. B. Cacciapuoti y A. Frangella:*
"La energía atómica."